

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 - strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Sledování krystalizace tlakových odlitků ze slitin zinku

Monitoring crystallization die castings of zinc alloys

Jana Holečková

KSP - SM - 562

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc. - TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D. - TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 65

Počet tabulek: 23

Počet obrázků: 40

Počet příloh: 2

Počet výkresů: 0

5. ledna 2011

A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Jana Holečková

Téma práce: Sledování krystalizace tlakových odlitků ze slitin zinku
Monitoring crystallization die castings of zinc alloys

Číslo DP: KSP - SM - 562

Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc. - TU v Liberci

Konzultant: Ing. Iva Nováková, Ph.D - TU v Liberci

Abstrakt:

Diplomová práce obsahuje základní poznatky o zinku a jeho slitinách, o konvenčních i moderních technologiích zpracování a použití těchto slitin a o vlivu tlaku na konečnou strukturu odlitků ze slitin zinku. Práce dále v experimentální části obsahuje vyhodnocení vzorků z konkrétních odlitků ze zinkových slitin s přihlédnutím na použitý tlak při výrobě těchto odlitků.

Klíčová slova: zinek, slitiny zinku, tlakové lití, krystalizační struktura, velikost zrna.

Abstract:

Thesis contains basic knowledge about zinc and zinc alloys, about conventional and modern processing technology and using these alloys and about pressure effect on final structure of zinc alloys castings. Thesis next in experimental part contains evaluation of samples from concrete zinc alloys castings with have a respect to used pressure of these castings.

Key words: zinc, zinc alloys, die casting, crystalline structure, grain size.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. ledna 2011

.....
Jana Holečková
Žďár u Kumburku 10
512 51 Lomnice nad Popelkou

Poděkování

Chtěla bych poděkovat všem, kteří svou pomocí a podporou přispěli k vypracování této diplomové práce, zvláště vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za pomoc a odborné rady, Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za pomoc při tvorbě experimentální části diplomové práce, a v neposlední řadě také rodičům za trvalou podporu během celé doby studia.

V Liberci, 5. ledna 2011

.....

Jana Holečková



OBSAH

SEZNAM ZKRATEK.....	7
1. ÚVOD.....	8
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	9
2.1.Charakteristika zinku a jeho slitin.....	9
2.1.1.Čistý zinek.....	9
2.1.2. Slitiny zinku.....	11
2.1.3. Slévárenské slitiny zinku.....	14
2.1.4. Slitiny zinku pro lití pod tlakem.....	17
2.1.5. Slitiny zinku pro gravitační lití.....	20
2.1.6. Slitiny zinku pro méně obvyklé metody lití.....	20
2.1.7. Použití zinku a zinkových slitin.....	21
2.2. Technologie tavení zinku a jeho slitin.....	22
2.3. Technologie odlévání pod tlakem.....	24
2.3.1. Metoda odlévání pod vysokým tlakem.....	24
2.3.2. Krystalizace u lití pod tlakem.....	27
2.3.3. Výhody a nevýhody lití pod tlakem.....	28
2.3.4. Stroje a zařízení na odlévání.....	29
2.3.5. Méně obvyklé metody tlakového lití.....	33
2.4. Vlastnosti odlitků odlévaných metodou lití pod tlakem.....	33
2.4.1. Technologické vlastnosti pro lití pod tlakem.....	33
2.4.2. Užité vlastnosti odlitků ze slitin zinku.....	35
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	37
3.1. Charakteristika výroby odlitků ze slitin zinku.....	38
3.1.1. Příprava taveniny pro tlakové lití zinku.....	38
3.1.2. Stroj s teplou lící komorou Frech DAW 50.....	39
3.2. Hodnocení krystalizace odlitků ze slitin zinku.....	40
3.2.1. Popis a hodnocení vzorků.....	41
3.2.2. Měření tvrdosti odlitků.....	59
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	62
5. ZÁVĚR.....	63
6. POUŽITÁ LITERATURA.....	65

SEZNAM ZKRATEK

m	-	hmotnost [kg]
ρ	-	hustota [kg.m^{-3}]
p	-	tlak [Pa]
Z	-	protonové číslo
Ar	-	relativní atomová hmotnost
T_t	-	teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]
T_v	-	teplota varu [$^{\circ}\text{C}$]
Rm	-	pevnost [MPa]
\varnothing	-	průměr [mm]
δ_Z	-	šířka zářezu [mm]
δ_{od}	-	šířka odlitku [mm]
S_Z	-	plocha zářezu [mm^2]
S_{od}	-	plocha odlitku [mm^2]
v	-	rychlost taveniny [m.s^{-1}]
n	-	rychlost tvorby zárodků [$\text{m}^{-3}.\text{s}^{-1}$]
v	-	rychlost růstu zárodků [m.s^{-1}]
U	-	aktivační energie difúze atomů taveniny v blízkosti zárodků [J.mol^{-1}]
σ	-	povrchové napětí na rozhraní tavenina –zárodek krystalu [N.m^{-1}]
T	-	teplota [K]
ΔT	-	podchlazení taveniny [K]
R	-	univerzální plynová konstanta [$\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$]
ΔG	-	změna volné entalpie [J.m^{-3}]
k	-	Bolzmanova konstanta [J.K^{-1}]
T_E	-	rovnovážná teplota počátku krystalizace [K]
T_S	-	rovnovážná teplota solidu [K]
T_L	-	rovnovážná teplota likvidu [K]
S	-	plocha styku zárodku s taveninou [m^2]
V_L	-	molový objem tekuté fáze [$\text{m}^3.\text{mol}^{-1}$]
V_S	-	molový objem tuhé fáze [$\text{m}^3.\text{mol}^{-1}$]
F	-	síla zatížení [N]
\bar{x}	-	průměrná hodnota
s	-	směrodatná odchylka
v	-	variační koeficient
t_L	-	teplota lití [$^{\circ}\text{C}$]

1. ÚVOD

Slévárenství je jedním z nejstarších a zároveň nejdůležitějších odvětví našeho i světového průmyslu. Současná slévárenská výroba umožňuje produkovat přesné a kvalitní odlitky s využitím nejmodernějších technologií. Jsou používány progresivní metody výroby odlitků, které vedou k úspoře materiálu i energie. K těmto metodám se řadí vysokotlaké lití. Jeho počátky spadají do 2. poloviny 19. století. Až do dvacátých roků 20. století se používala výhradně technologie lití pod tlakem do teplé lící komory. Metody tlakového lití s teplou komorou jsou využívány u slitin s nízkou teplotou tání. K těmto slitinám se řadí slitiny zinku, které nachází čím dále větší uplatnění při odlévání drobných předmětů. Slitiny zinku se vyznačují dobrou slévatelností a umožňují odlévání vysoce jakostních odlitků s dobrými mechanickými vlastnostmi za normálních teplot. Odlitky ze slitin zinku lze odlévat do hmotnosti 0,5 [kg]. Velkou výhodou těchto slitin je odolnost proti některým kapalinám (benzin).

Problematikou sledování vlastností slitin zinku se v současné době zabývají pracovníci na Katedře strojírenské technologie – FS TU v Liberci, sledují vliv tlaku na podmínky krystalizace odlitků s různou tloušťkou stěn.

Také s touto problematikou souvisí řešení mé diplomové práce, jejíž úkolem je „Sledování krystalizace tlakových odlitků ze slitin zinku“. Součástí řešení práce je seznámení se slitinami zinku, jednotlivými výrobními technologiemi se zaměřením na vysokotlaké lití a krystalizací slitin zinku. Dalším úkolem je provedení vyhodnocení krystalických struktur odlitků, které jsou odlity metodou vysokotlakého lití ve firmě Beneš a Lát, a.s. závod Slaná u Semil.

Diplomová práce byla vypracována na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže, 2822 ze strany TUL v Liberci, v rámci specifického vysokoškolského výzkumu.

2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1. Charakteristika zinku a jeho slitin

2.1.1. Čistý zinek

Zinek je namodrale bílý kov se silným leskem, který se však ztrácí na vlhkém vzduchu. Jeho mřížka krystalizuje v hexagonální soustavě. Hlavní osa jeho elementární mřížky je však podstatně delší, než odpovídá těsnému uspořádání. U monokrystalů je anizotropie některých fyzikálních a mechanických vlastností velmi výrazná. Např. tepelná roztažnost zinku ve směru hlavní osy je téměř 5x větší než ve směru kolmém. Mechanické vlastnosti jsou samozřejmě do jisté míry také ovlivňovány nečistotami. V tabulce 2.1 jsou uvedeny vlastnosti čistého zinku.

Tab. 2.1 Vybrané vlastnosti zinku

Protonové číslo Z	Relativní atomová hmotnost A_r	Teplota tání T_t [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota varu T_v [$^{\circ}\text{C}$]	Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v čistém stavu R_m [MPa]
30	65,38	419	907	7130	120

Zinek je v zemské kůře poměrně bohatě zastoupen. Průměrný obsah činí kolem 100 [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], čemuž odpovídá 76 ppm (parts per milion = počet částic na 1 milion částic). Tímto rozšířením v zemské kůře se řadí k prvkům jako je rubidium (78 ppm) a měď (68 ppm). Také v mořské vodě je jeho koncentrace značně vysoká - 0,01 miligramu v jednom litru. Předpokládá se, že ve vesmíru připadá na jeden atom zinku přibližně 100 milionů atomů vodíku.

Hlavním minerálem a rudou pro průmyslovou výrobu zinku je sfalerit neboli blejno zinkové ZnS , v přírodě se v malém množství vyskytuje také další minerál se složením ZnS , avšak v jiné krystalové modifikaci známý jako wurtzit. Dalšími minerály zinku jsou smithsonit neboli kalamín uhličitý ZnCO_3 , kalamín křemičitý $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$, willemmit Zn_2SiO_4 , troosit $(\text{Zn}, \text{Mn})_2\text{SiO}_4$, zinkit neboli červená ruda zinková ZnO , franklinit $(\text{Zn},$

Mn)O.Fe₂O₃, zinečnatý spinel ZnO.Al₂O₃ a hemimorfit Zn₄Si₂O₇(OH)₂. Vzácně se v přírodě můžeme setkat také s elementárním, kovovým zinkem.

Velká naleziště zinkových rud, zejména sfaleritu a smithsonitu, se nachází v Kanadě, Spojených státech amerických a Austrálii. Malá množství zinku bývají také v železných rudách a při zpracování rud železa ve vysoké peci se hromadí v podobě zinkového prachu z kychtových plynů. Může to být 30 % i více, a proto se pro výrobu zinku vychází i z tohoto materiálu.

Výroba zinku - zinek se z 90 % vyrábí ze svých sulfidických rud. Nejvýznamnější zinkovou rudou je sfalerit (ZnS). Proces výroby začíná koncentrací rudy sedimentačními nebo flotačními technikami a následně pražením rudy za přístupu kyslíku, podle rovnice:



vedlejší produkt oxid siřičitý se zachycuje a následně používá pro výrobu kyseliny sírové. Oxid zinečnatý se dále zpracovává elektrolyticky nebo tavením s koksem.

Při elektrolytickém způsobu výroby zinku se oxid zinečnatý rozpouští v kyselině sírové a z výluhu se cementací zinkovým prachem získává kadmium. Roztok síranu zinečnatého se elektrolyzuje a kov s čistotou 99,95 % se vylučuje na hliníkové katodě.

Redukce oxidu zinečnatého koksem se dříve prováděla v soustavě horizontálních retort s vnějším ohřevem a pracovaly vsádkovým způsobem. Časem byly nahrazeny kontinuálně pracujícími vertikálními retortami, které měly někdy elektrické vyhřívání. Ani jeden z těchto dvou procesů nemá takovou termickou účinnost jako má vysoká pec, ve které spalování paliva pro zahřívání probíhá ve stejném prostoru jako redukce oxidu. Problém při výrobě zinku tímto způsobem je v tom, že redukce oxidu zinečnatého uhlíkem neprobíhá pod teplotou varu zinku. Navíc při následném ochlazení par zinku dochází k reakci těchto par s oxidem uhličitým za vzniku oxidu zinečnatého a oxidu uhelnatého. Teprve v padesátých letech dvacátého století se podařilo vyrobit takovou vysokou pec, která dokázala zvládnout problém výroby. Zinkové páry, které opouští vrchol pece jsou tak rychle schlazovány a rozpouštěny zkrápěným olovem, že zpětná oxidace na oxid zinečnatý je minimální. Zinek se následně odděluje jako kapalina s 99 % čistotou. Poté je rafinován vakuovou destilací, čímž se získá 99,99 % čistý zinek:



Na vlastnosti zinku nepříznivě působí příměsi olova, železa, kadmia a cínu, méně škodlivými jsou příměsi arzenu, křemíku, antimonu, vizmutu nebo stříbra. Podle obsahu nečistot rozdělujeme zinek následovně:

a) zinek jemný – čistota v rozsahu 99,5% až 99,995% (pro tvářené zinkové slitiny a zinkové plechy pro polygrafický průmysl)

zinek rafinovaný – čistota 98,5% až 99% (běžné slitiny mědi a pro pozinkování lázně)

surový hutní zinek – čistota 97% (na pájky a slévárenské slitiny mědi)

Světová produkce zinku je stálá a pohybuje se kolem 6 milionů tun za rok. Zinek je po železe, mědi a hliníku čtvrtým nejvíce průmyslově vyráběným kovem. Nejvíce rudy se vytěží v Kanadě, ale většina se zpracovává jinde.

Slitiny zinku

V technické praxi mají uplatnění především slitiny zinku. Základní bází všech praktických slitin zinku je soustava Zn - Al. Nedostatkem binárních slitin zinku je jejich sklon ke stárnutí, což je proces mající za následek objemovou kontrakci odlitků. Projevuje se také u slitin ternárních i vícesložkových. Objemová kontrakce může vyvolat vznik vnitřních pnutí a v jejich důsledku i zrychlení procesu mezikrystalové koroze, při které se objem odlitku naopak zvětšuje a dochází k jeho praskání. Proti těmto jevům působí ve slitinách zinku přísada hořčíku. Hořčík však zhoršuje slévárenské vlastnosti těchto slitin, proto jeho obsahy bývají co možná nejmenší, řádově většinou 10^{-2} %. Tepelným zpracováním urychlujícím proces stárnutí, a tedy zkracující čas pro dosažení rozměrové stability odlitku, je stabilizační žíhání, např. 3 až 6 [hod] při teplotě 100 [°C], 5 až 10 [hod] při teplotě 85 [°C] nebo 10 až 20 [hod] při teplotě 75 [°C].

2.1.2. Slitiny zinku

V technické praxi mají značné uplatnění slitiny zinku, které jsou binární nebo ternární. Binární slitiny jsou typu Zn – Al, Zn – Cu, ternární jsou typu Zn – Al – Cu. Dále se tyto slitiny dělí na slévárenské a pro tvářenění. Větší uplatnění mají slévárenské slitiny zinku. Slévárenské slitiny zinku se podle způsobu jejich zpracování dělí do tří skupin:

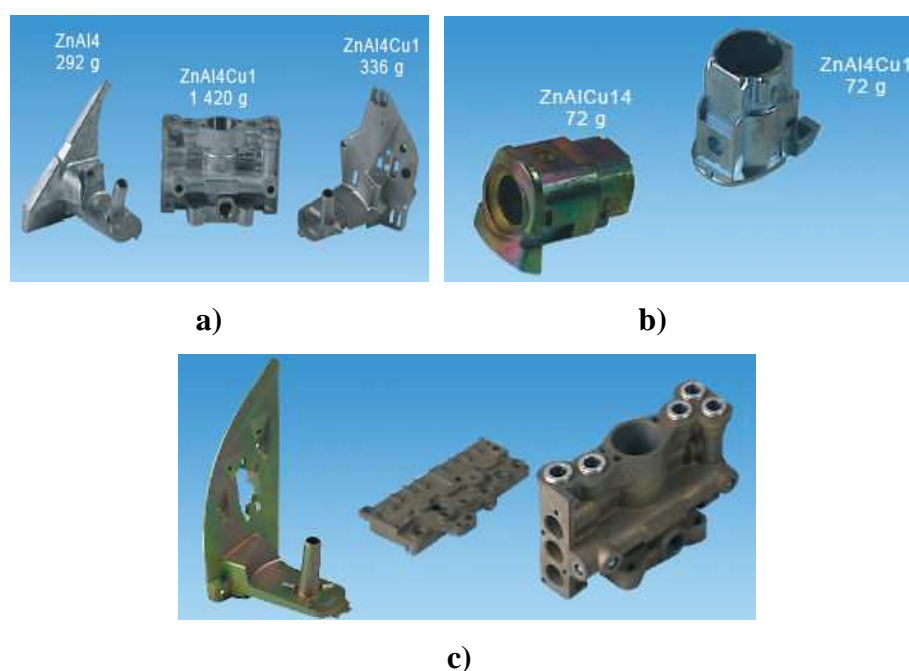
- a) slitiny pro tlakové lití,
- b) slitiny pro gravitační lití,
- c) slitiny pro méně obvyklé metody lití.

Prevažná většina odlitků ze slitin zinku se vyrábí tlakovým litím, což podle vyráběného množství odlitků lze slévárenské slitiny zinku je technologie vyvinutá již před více než půl stoletím. Starší způsob lití do pískových a keramických forem svého rozvoje dosáhl už v polovině 19. století. V současné době je méně významný, avšak lze očekávat, že v dalších letech dozná širšího použití jako způsob vhodný pro odlitky ze slitin zinku

vyráběné v malých sériích, které tak mohou nabýt většího uplatnění. Méně časté metody lití, například lití do sádrových forem nebo do forem ze silikonové pryže apod., se pro zinkové slitiny dosud používají ojediněle.

Nepatrná rozpustnost řady prvků v zinku má za následek jejich přednostní výskyt v podobě kovových či nekovových příměsí mezi větvemi dendritů krystalizující slitiny, a to v množství tím větším, čím nižší je rychlost tuhnutí.

Jak je z výše uvedeného, slévárenské slitiny zinku obsahují jako hlavní přísadový prvek hliník. Na obr. 2-1 jsou pro ilustraci uvedeny typy slévárenských slitin zinku a odlitky z nich vyrobeny.



a) bez úprav, b) s galvanickou povrchovou úpravou,
c) s opracováním, povrchovou úpravou a montáží

Obr. 2-1 Odlitky vyrobené tlakovým litím z vybraných slitin zinku [7]

Slitiny zinku pro tváření bývají typu Al-Cu nebo Al – Cu – Mg. Tvářením za studena se zinek do jisté míry zpevňuje, avšak při překročení určitého stupně tváření dochází k zotavení, popř. rekrytalizaci. Zpevnění čistého zinku za normální teploty není také stále, ale soustavně se zmenšuje zvolna probíhajícím zotavováním. Z tohoto důvodu je podle toho potřeba přihlížet na výsledky mechanických zkoušek, které do určité míry záleží na rychlosti zatěžování. Na rekrytalizační teplotu čistého zinku působí nečistoty

a to především železo. Je-li obsah železa v tisícinách procenta, rekrystalizuje zinek při normální teplotě. Je-li však obsah železa 0,01%, rekrystalizuje zinek při teplotě 30 až 100 [°C]. Velmi nepříznivou vlastností zinku je jeho tečení za normální teploty. Tvářený a vyžíhaný zinek teče velmi zvolna, ale rychlost tečení za vyšších teplot se značně zvětšuje. Naopak je tím menší, čím má zinek hrubší krystalickou stavbu.

Litý zinek není za studena tvárný. Jeho tvárnost se však značně zlepšuje již při teplotě asi 100 [°C], kdy skluz probíhá v několika kluzných rovinách. Počáteční tváření z litého stavu je proto třeba provádět nad touto teplotou v rozmezí asi 100 až 150 [°C]. Další tváření je již možné za studena.

Slitiny zinku mají výborné mechanické vlastnosti za normální teploty, lepší, než většina slitin hliníku, mědi a litiny s lupínkovým grafitem. Dynamické vlastnosti jsou rovněž dobré. Díky značné tvrdosti jsou odlitky odolné proti opotřebení. Na obr. 2-2 je uveden přehled vybraných mechanických vlastností v porovnání s dalšími kovy.



Obr. 2-2 Porovnání mechanických vlastností slitin zinku s dalšími kovy
za normální teploty [10]

Značnou nevýhodou slitin zinku je prudký pokles mechanických vlastností při vyšších teplotách. Maximální provozní teplota proto nemá přesáhnout asi 120 [°C]. Také při nízkých teplotách (pod asi -20[°C]) dochází ke zhoršení mechanických vlastností, zvláště rázové houževnatosti.

Na povrchu zinku a jeho slitin se na vzduchu vytváří vrstva uhličitany $4Zn(OH)_2 \cdot CO_2$ šedé barvy, která je ve vodě téměř nerozpustná a chrání odlitek před oxidací. Odlitky mohou být korozně napadeny ve styku s vodní párou, kyselinami a zásadami. Horká voda naopak těmto odlitkům neškodí. V elektricky vodivém styku s jinými kovy mohou být ve vlhké atmosféře napadeny elektrokorozí. Slitiny zinku jsou naopak velmi odolné proti

dlouhodobému působení benzínu a olejů, což je spolu s jejich velmi dobrou slévateľností předurčilo k odlévání tvarově složitých karburátorů spalovacích motorů.

K povrchové úpravě odlitků se zinku se často používá galvanické pokovování, kterým se nanáší vrstva mědi, niklu, chrómu, mosazi, stříbra, případně i zlata.

Zinek samotný se také používá k povrchové úpravě při galvanickém pozinkování nebo při žárovém pozinkování ocelových plechů a konstrukcí.

Obrábění slitin zinku lze provádět běžnými nástroji. Použitím rychlořezných ocelí, keramiky nebo slinutých karbidů lze dosáhnout lepší jakosti povrchu.

Pájení odlitků ze slitin zinku běžnými Pb - Sn pájkami lze provádět především tehdy, jsou-li galvanicky poniklovány. K pájení galvanicky nepokoveného odlitku je vhodná pájka o složení (hm. %) 82,5 % Cd a 17,5 % Zn.

Odlitky ze slitin zinku lze svařovat plamenem s redukční atmosférou. Jako přídatný materiál se používá tyčinka odlitá ze slitiny obdobného složení jako má samotný odlitek.

2.1.3. Slévářenské slitiny zinku

Soustava Zn - Al

Oba kovy jsou v kapalném stavu dokonale rozpustné. V tuhém stavu je rozpustnost hliníku v zinku omezená, ale v hliníku se zinek rozpouští ve značném množství. Za eutektické teploty je ve fázi β 1 % Al, za normální teploty jen asi 0,05 % Al.

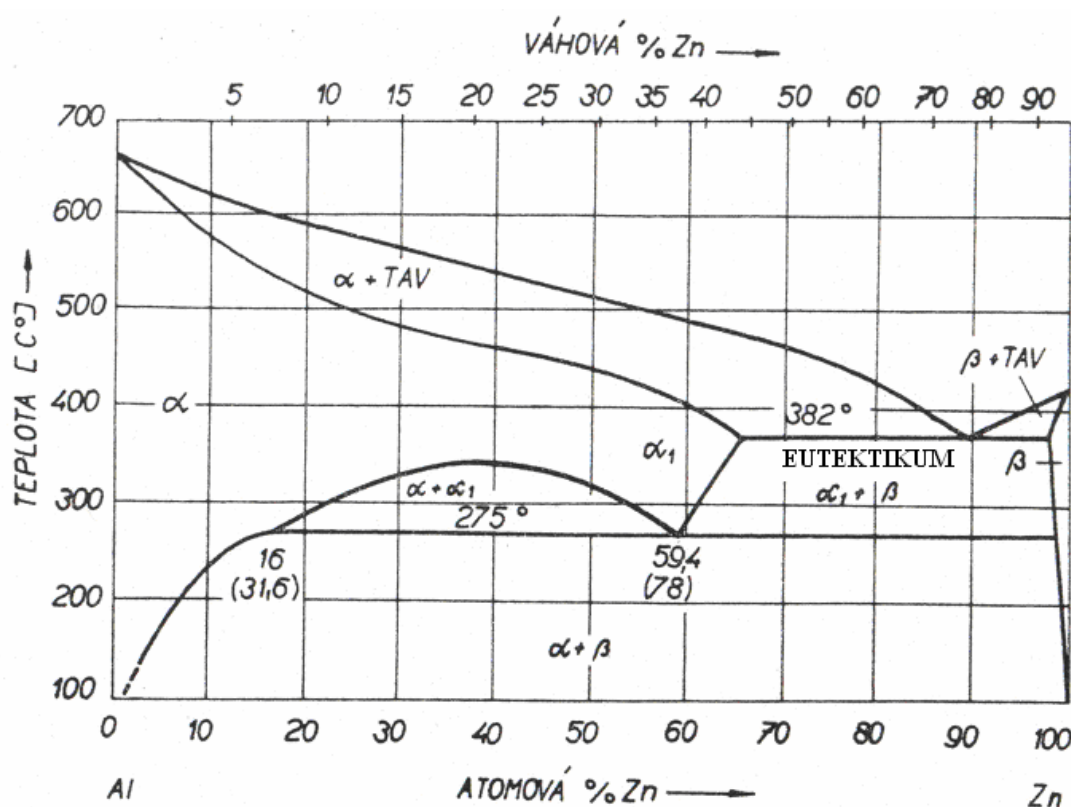
Při eutektické teplotě 382[°C] se tavenina rozpadá na eutektikum $\alpha_1 + \beta$. Při eutektoidní teplotě 275 [°C] dochází k eutektoidní přeměně $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$. Rozmezí této eutektoidní přeměny je od 31,6 do 78 % Zn. V tomto koncentračním rozmezí jsou nad eutektoidálou dvě fáze α_1 a α , obě kubické, plošně centrované s přibližně stejnými mřížkovými parametry.

Eutektoidní rozpad $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$ má velký význam u slitin litých pod tlakem, kde velká rychlost ochlazování má vliv jednak na vlastní eutektoidní přeměnu, jednak, a to v mnohem větší míře, na rozpad přesyceného roztoku $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$ po ochlazení. Rozpad $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$ je doprovázen kontrakcí.

Jak je zřejmé, mají slévářenské slitiny přibližně eutektické až nadeutektické složení a tuhnutí obvykle začíná vylučováním primární fáze α - Al. Nejnižší tavicí teplotu a nejužší interval tuhnutí mají přibližně eutektické slitiny s obsahem kolem 4 - 5 % Al. Čím vyšší

je obsah hliníku, tím vyšší je teplota likvidu a také je širší pásmo tuhnutí. Vedlejšími přísadovými prvky jsou zejména měď a hořčík.

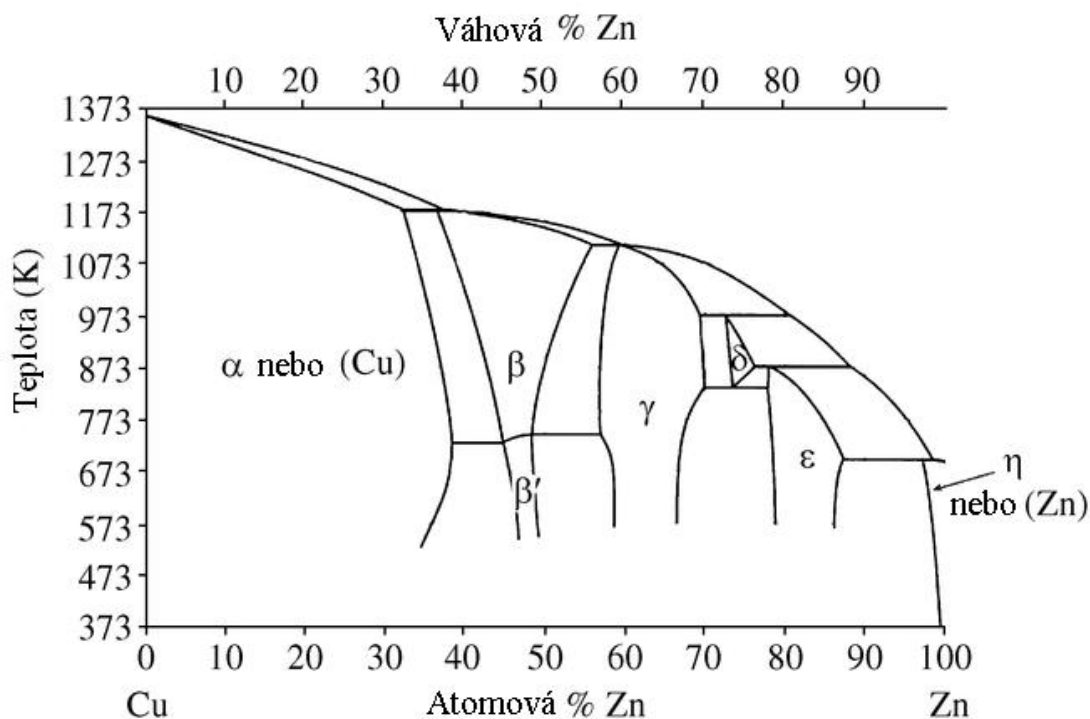
Měď, stejně jako hliník, zmenšuje velikost zrna, zvyšuje mechanické vlastnosti slitin, zvláště pevnost, tažnost a rázovou houževnatost a zlepšuje zabíhavost slitin. Při obsahu nad 0,7 % Cu se zlepšuje odolnost proti korozi. Ve slitinách bývá obsah mědi v rozmezí 0,5 - 3 % Cu. Hořčík již ve velmi malém množství zvyšuje pevnost a kompenzuje škodlivý vliv cínu, olova a kadmia. Obsah hořčíku bývá 0,01 - 0,03 % Mg.



Obr. 2-3 Rovnovážný diagram Zn – Al [1]

Soustava Zn - Cu

Na rozdíl od hliníku, zvyšuje přísada mědi teplotu tání zinku. Po peritektické přeměně při teplotě 424 [°C] stoupá křivka likvidu prudce vzhůru. Ve struktuře technických slitin Zn - Cu, které obsahují maximálně asi 4% Cu, jsou vedle sebe tuhé roztoky $\eta + \epsilon$. Rozpustnost mědi v krystalech se s klesající teplotou zmenšuje a probíhající segregace souvisí s objemovými změnami, podobně jako u slitin Zn - Al. Žháním při teplotě asi 80 až 100 [°C] s následujícím volným ochlazováním je možno objemové změny zmenšit na minimum.



(teplota ve $^{\circ}\text{C}$ = $T[\text{K}] - 273,15$)

Obr. 2-4 Rovnovážný diagram Zn – Cu [1]

Soustava Zn-Al-Cu

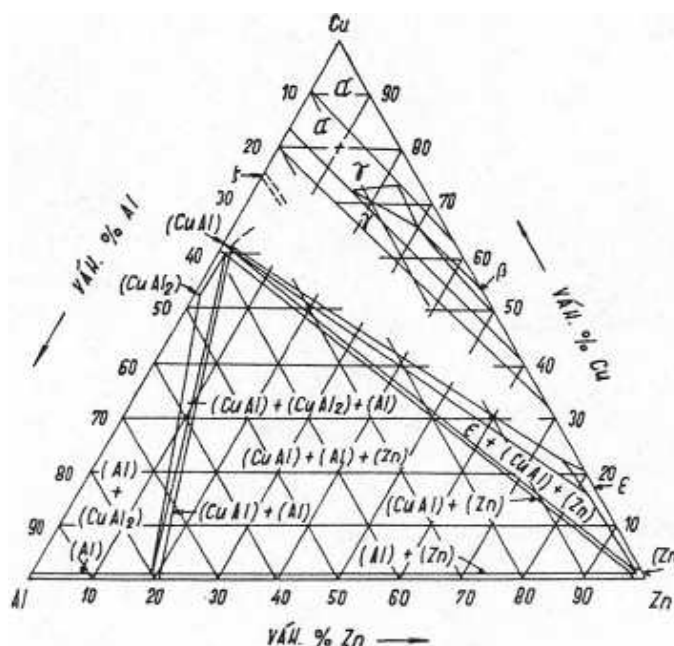
Při teplotě ternárního eutektika 375 [$^{\circ}\text{C}$] jsou v rovnováze čtyři fáze (obr. 2-5):

kapalná	7 % Al	3,9 % Cu
tuhý roztok bohatý na Zn	1,3 % Al	2,9 % Cu
tuhý roztok bohatý na Al		1,8 % Cu
fáze ϵ Cu - Zn	1,4 % Al	15,2 % Cu

Při nižších teplotách se fáze bohatá hliníkem rozpadá. Vliv mědi na tento rozpad není znám. Rozpustnost mědi a hliníku v tuhém zinku od eutektické teploty klesá na 0,9 % Al a 1,9 % Cu při 274 [$^{\circ}\text{C}$].

Ternární slitiny mají, podobně jako slitiny Al - Zn, sklon ke stárnutí. Jeho podstatou je probíhající precipitace a segregace fází vedoucí k objemovým změnám.

Třebaže jde o důležitý diagram, není zcela prostudován do podrobností.



Obr. 2-5 Rovnovážný diagram Zn - Al – Cu [1]

2.1.4. Slitiny zinku pro lití pod tlakem

Tyto slitiny se dělí na slitiny pro tlakové lití ingotů a slitiny pro tlakové lití odlitků. Jejich základní bází je binární slitina Zn-Al obsahující 3,8 až 4,0 % hliníku, tedy slitina v blízkosti eutektického obsahu hliníku v soustavě Zn-Al. Jak je zřejmé z rovnovážného diagramu této soustavy, interval tuhnutí těchto podeutektických slitin představuje jen několik °C. Slitiny mají výborné slévárenské vlastnosti, lze je snadno povrchově upravovat, jejich cena na trhu není vysoká a mají dobré mechanické vlastnosti. Uplatňují se zejména v elektrotechnice a strojírenství.

V průběhu desetiletí byli vyvinuty slitiny s optimalizovaným obsahem prvků. Mají stejný obsah hliníku (3,5 - 4,3 %), ale rozdílné obsahy mědi, hořčíku a příměsových prvků Fe, Pb, Cd a Sn. Jsou známé jako slitiny ZAMAK (z německého Zink, Magnesium, Kupfer = zinek, hořčík, měď) americké společnosti New Jersey Zinc Co. nebo jako slitiny normované dle ASTM (americká norma). Do této řady patří slitiny zinku zařazené v ČSN, a to slitina 42 3558 ZnAl4, slitina 42 3560 ZnAl4Cu1 a slitina 42 3562 ZnAl4Cu3. Tyto slitiny označované dle ČSN s obsahem asi 4 % Al, se také označují podle obsahu Al, Cu a Mg jako Z400 (ZnAl4), Z410 (ZnAl4Cu1), Z430 (ZnAl4Cu3). Tyto slitiny mají poněkud nižší mechanické vlastnosti a rychlejší pokles pevnosti za zvýšených teplot.

Tab. 2.2 Chemické složení [hm. %] slitin zinku pro tlakové lití dle ASTM [9]

Označení	Cu	Al	Mg	Femax	Pbmax	Cdmax	Snmax	Ni	Zn
tlakově lité ingoty (ASTM B240)									
Alloy 3	0,1 max	3,9 - 4,3	0,02-0,05	0,075	0,004	0,003	0,002	-	zbytek
Alloy 5	0,75-0,25	3,9 - 4,3	0,03-0,06	0,075	0,004	0,003	0,002	-	zbytek
Alloy 7	0,1 max	3,9 - 4,3	0,01-0,02	0,075	0,002	0,002	0,001	0,005-0,02	zbytek
tlakově lité odlitky (ASTM B86)									
Alloy 3	0,25max	3,5 - 4,3	0,02-0,05	0,100	0,005	0,004	0,003	-	zbytek
Alloy 5	0,75-1,25	3,5 - 4,3	0,03-0,08	0,100	0,005	0,004	0,003	-	zbytek

Tab. 2.3 Chemické složení [hm. %] slitin zinku pro tlakové lití dle ČSN [6]

ČSN	Al	Cu	Mg	Fe max	Cd+Pb max	Sn max	Rm[MPa]	A10[%]	HB
ZnAl4 42 3558	3,9- 4,3	0,10	0,02-0,05	0,075	0,009	0,001	160-180	1	60
ZnAl4Cu1 42 3560	3,9- 4,3	0,75- 1,25	0,02-0,05	0,075	0,009	0,001	270-330 ¹⁾ 180-220 ²⁾	2-5 ¹⁾ 1,5 ²⁾	80-100 ¹⁾ 70 ²⁾
ZnAl4Cu3 42 3562	3,5- 4,3	2,4-3,2	0,03-0,06	0,075	0,009	0,001	420-480 ¹⁾ 300 ²⁾	2-3 ¹⁾ 2 ²⁾	80-120 ¹⁾ 90 ²⁾
Mechanické vlastnosti: ¹⁾ pro odlitky lité pod tlakem ²⁾ pro odlitky lité do kokily									

Slitiny zinku pro tlakové lití nejsou určeny pro součásti vystavené zvýšeným teplotám. Jejich tečení při zatížení mechanickou silou se výrazně projevuje už při teplotách nad 75 [°C]. Při teplotě 110 [°C] se jejich pevnost v tahu snižuje o 30 % a tvrdost o 40 %. Za teplot pod bodem mrazu dochází k jejich křehnutí. Slitiny zinku s vyšší odolností proti tečení obsahují chrom (0,1 až 0,2 %) , titan (0,15 až 0,25 %) a obsah hliníku v je v nich snížen.

Tab. 2.4 Informativní hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností slitin zinku dle ČSN [7]

Vlastnost	Rozměr	ZnAl4 42 3558	ZnAl4Cu1 42 3560	ZnAl4Cu3 42 3562
Hustota	[kg.m ⁻³]	6600	6700	6800
Interval tuhnutí	[°C]	386-380	386-380	390-379
Maximální teplota přehřátí	[°C]	440	450	440
Smrštění při tuhnutí od teploty 470 [°C]	[%]	1,17	1,17	1,17
Střední izobar. součinitel délkové roztažnosti (20-100[°C])	[K ⁻¹]	27,4.10 ⁻⁶	27,4.10 ⁻⁶	27,4.10 ⁻⁶
Střední měrné teplo (20-100[°C])	[J.kg ⁻¹ . K ⁻¹]	400	400	400
Střední měrná tepelná vodivost (70-140[°C])	[W.m ⁻¹ . K ⁻¹]	11,3	10,9	10,5
Měrná elektrická vodivost při 20 [°C]	[S.m ⁻¹]	15-16	15	14,5-15
Teplotní koeficient el. odporu (0-100[°C])	-	0,0038	0,0035	0,0033
Nejnižší mez kluzu 0,2 v tahu	[MPa]	200-230	220-250	170-200 ¹⁾ 200-230 ²⁾
Nejnižší pevnost v tahu	[MPa]	245	275	215 ¹⁾ 235 ²⁾
Nejnižší tažnost A5	%	3-6	2-5	0,5-2 ¹⁾ 1-3 ²⁾
Nejnižší tvrdost podle Brinella	-	70	85	100
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	127 500	127 500	127 500
Pevnost v tlaku	[MPa]	412	598	-
Pevnost ve střihu	[MPa]	216	275	-
Mez únavy při 10 ⁸ cyklů	[MPa]	49	54	-
1) pro odlitky lité do pískových forem 2) pro odlitky lité do kovových forem				

Slitiny zinku mají vynikající zabíhavost, díky které lze odlévat tenkostěnné, tvarově komplikované odlitky. Dosažitelná nejmenší tloušťka stěny závisí na velikosti odlitku a na technologii odlévání. Při tlakovém lití lze u malých odlitků dosáhnout tloušťky stěn již od 0,3 [mm]. Při gravitačním lití obvykle nad asi 1 [mm]. Slitina výborně kopíruje tvar formy, odlitky mají ostré kontury a hrany. Tlakovým litím lze předlévat otvory od \varnothing 1 [mm]. Díky nízkým licím teplotám se dosahuje i vysoké přesnosti odlitků. Při tlakovém lití malých odlitků je reálná přesnost od $\pm 0,03$ [mm] (IT 10), u velkých odlitků s rozměry kolem 500 [mm] přesnost cca $\pm 0,2$ [mm] (IT 11). To umožňuje odlévat řadu odlitků na hotovo, případně navrhovat jen malé přídavky na obrábění. Odlitky mají v litém stavu kvalitní povrch s malou drsností.

2.1.5. Slitiny zinku pro gravitační lití

Na rozdíl od slitin typu ZnAl₄ pro tlakové lití, které jsou podeutektické, mají slitiny používané pro gravitační lití do pískových, grafitových nebo keramických forem (skořepin) nadeutektickou koncentraci hliníku (8 až 27 hm. %). V případě potřeby je lze použít i pro tlakové lití. Tyto slitiny mají výborné slévárenské vlastnosti, při jejich tavení a odlévání není třeba krycí strusky, ani odplynění. Vykazují mechanické vlastnosti jako slitiny pro tlakové lití. V současné době se z těchto slitin nejvíce používá slitina ZA 12.

Tab. 2.5 Chemické složení [hm. %] slitin zinku pro gravitační lití dle ASTM [7]

Označení	Cu	Al	Mg	Femax	Pbmax	Cdmax	Snmax	Zn
ASTM B669								
ZA 8	0,8-1,3	8,0-8,8	0,015-0,03	0,10	0,004	0,003	0,002	zbytek
ZA 12	0,5-1,25	10,5-11,5	0,015-0,03	0,75	0,004	0,003	0,002	zbytek
ZA 27	2,0-2,5	25,0-28,0	0,01-0,02	0,10	0,004	0,003	0,002	zbytek

2.1.6. Slitiny zinku pro méně obvyklé metody lití

Tyto slitiny zinku obvykle obsahují 4,75 až 5,5 hm. % hliníku a malé množství mědi a křemíku. Jsou vhodné pro malé, tvarově složité odlitky s menšími nároky na pevnostní vlastnosti. Jsou rozměrově stálé a lze je odlévat méně běžnými způsoby.

Uplatnění odlitků ze slitin zinku v konkurenci se slitinami Al a Mg

Slitiny zinku jsou vytlačovány nejvíce slitinami hliníku a hořčíku. Hlavními oblastmi využití odlitků jsou nábytkářský průmysl včetně kování oken a dveří, dále pak sanitární technika, elektrotechnický průmysl a v neposlední řadě automobilový průmysl.

Výhody odlitků vyráběné vysokotlakým způsobem ze slitin Zn:

- a) vysoká přesnost odlitků s minimálními úkosy,
- b) minimální náklady na opracování,
- c) vysoká životnost nářadí,
- d) výroba drobných odlitků až okolo 1 gramu,
- e) velmi jakostní povrch,
- f) minimální nároky na další operace po odlití,
- g) vyšší produktivita výroby v procesu lití,
- h) dobré vlastnosti pro následné povrchové úpravy včetně galvanických úprav.

2.1.7. Použití zinku a zinkových slitin

Z hlediska spotřeby je zinek čtvrtým průmyslově nejpoužívanějším kovem (po železe, hliníku a mědi). V současné době jeho roční světová produkce překračuje 4 milióny tun a jeho cena se pohybuje kolem 1430 USD/tunu.

Je používán k těmto účelům:

- a) protikorozní ochranné vrstvy na výrobcích ze slitin železa – výroba nejčastěji galvanickým pokováním, postřikováním, napařováním nebo žárovým nanášením tenkého povlaku zinku,
- b) slévárenské slitiny – díky výborné zatékavosti. Vyrábějí se tak kovové součástky, které mají dobrou odolnost vůči atmosférickým vlivům (nekorodují), ale není třeba velké mechanické odolnosti, protože zinek je mechanicky velmi málo odolný. Příkladem mohou být některé části motorových karburátorů, kovové ozdoby, okenní kliky, konve, vědra, vany, střešní okapy, střechy apod. Obkládání nádrží, skříní, ledniček apod.,
- c) výroba galvanických článků (a jejich baterií). Dodnes je běžně užíván zinko-uhlíkový článek. V této oblasti je ale zinek postupně nahrazován jinými kovy, zejména niklem a během několika let lithiem.,
- d) legující prvek ve slitinách mědi, hliníku, hořčíku, případně dalších kovů,

- e) oxid zinku (malířská běloba, bílá skalice),
- f) jiné použití.

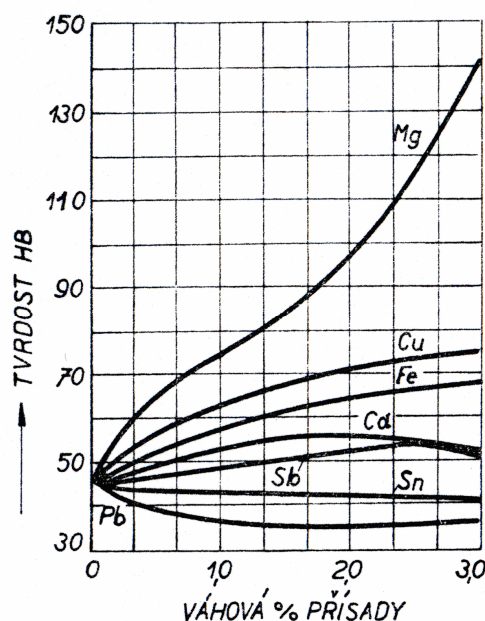
2.2. Technologie tavení zinku a jeho slitin

Pro zinek a zinkové slitiny je charakteristická nízká teplota tání. Tavení se uskutečňuje v zařízeních s různou konstrukcí. Ve slévárnách vyrábějících ingoty se používají vanové pece (elektrické odporové a plynové) nebo indukční kanálové pece. Ve slévárnách vyrábějících tvarové odlitky (kokilové a tlakové lití) se na tavení zinkových slitin používají kelímkové pece (elektrické odporové a plynové). Zinek rychle oxiduje, zejména ve vlhkém prostředí. ZnO není v tavenině rozpustný.

Rafinace taveniny od nekovových nečistot se uskutečňuje pomocí NH_4Cl (0,1 až 0,2%) při 450 až 470 [°C] nebo filtrací přes síťové, případně zrnité filtry. Materiálem síťových filtrů může být skelná tkanina (s velikostí ok 1 x 1mm), titan apod. Zrnité filtry se připravují z magnésitu, allundu, grafitu, chloristých a fluoristých solí. Odstranění nekovových nečistot filtrací přes zrnitý filtr s šířkou 70 až 150 [mm], s rozměrem zrn 3 až 4 [mm] ohřátého na 450 [°C] je účinnější v porovnání se zpracováním taveniny NH_4Cl .

Další způsob odstraňování škodlivých nečistot ze slitin zinku a také jejich dezoxidace se také často provádí rafinací taveniny granulemi z umělých hmot, například z polystyrenu. Polystyren uložený na dno lázně v množství přibližně 200 [g] na 1 tunu kovu se rozkládá na uhlovodíky s redukčními vlastnostmi (redukce oxidů, zejména oxidů zinku).

Zinek a jeho slitiny jsou velmi citlivé na přehřátí taveniny. Kromě velkých ztrát zinku vypařováním (důsledkem nízké teploty varu), způsobuje přehřátí taveniny vznik sloupkovité struktury, která se nepříznivě projevuje při tváření a v případě výroby tvarových odlitků způsobuje vznik poruch souvislosti za podmínky brzděné dilatace odlitku. Z těchto důvodů přehřátí zinku nad 500 [°C] a slitin typu Zn-Al-Cu nad 450 [°C] není dovoleno. Zinek a jeho slitiny jsou také velmi citlivé na znečištění příměsemi. Tisíciny procenta olova, cínu a kadmia způsobují intenzivní mezikrystalickou korozi. Z tohoto důvodu se při tavení čistého zinku a na přípravu zinkových slitin používají jen velmi čisté vsázkové materiály.



Obr. 2-6 Vliv různých prvků na tvrdost slitin zinku [1]

Ochrana taveniny před ovzduším není nutná. Přetavení odpadu na jeho rafinaci od kovových příměsí se uskutečňuje ve vanových pecích pod vrstvou dřevěného uhlí při maximální teplotě 460 až 480 [°C]. Odstranění olova a železa se realizuje odstátím taveniny po dobu 1,5 až 2 hodiny, při kterém se např. obsah olova snižuje asi 2 až 2,5 krát. Při velkém znečištění taveniny nekovovými příměsemi se doporučuje zpracování NH_4Cl . Teplota lití je 430 až 480 [°C].

Při přípravě slévárenské slitiny typu Zn - Al - Cu vsázkové suroviny představují zinek, hliník, předslitina Cu50 - Al50, Katodová měď a vlastní materiál. Pořadí vsázkování je následující: předslitina Cu-Al, vratný materiál, polovina celkového množství zinku, zásyp z dřevěného uhlí. Do taveniny předeřháté na 500 až 550 [°C] se přidává hliník a po jeho rozpuštění zbytek zinku. Tavenina se promíchá, z jejího povrchu se odstraní uhlí a struska, na dno kelímku se přidá hořčík. Po důkladném promíchání taveniny se odstraní zbytek strusky. Odlévání se provádí při 420 až 450 [°C] přes síťové nebo zrnité filtry. V případě potřeby se tavenina rafinuje NH_4Cl . Při vyšším obsahu mědi ve slitině, než je obsah hliníku, se složení vsázky koriguje katodovou mědí nebo binární mosazí, která se do pece přidává současně s předslitinou Cu - Al. Teplota lití slitiny se zvýšeným obsahem mědi je 550 až 560 [°C].

2.3. Technologie odlévání pod tlakem

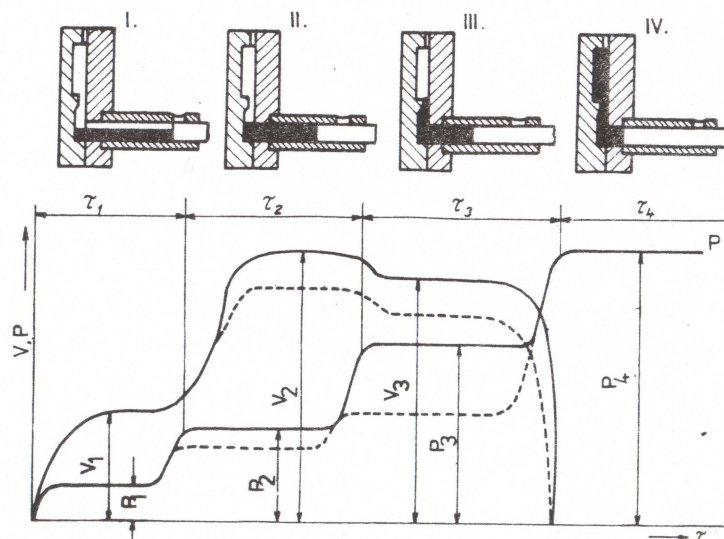
Ve slévárenské praxi je často třeba vyrábět odlitky, které není možné odlévat gravitačně, protože je třeba působit na tekutý kov o mnoho většími silami. Jde o tenkostěnné a přesné odlitky s dobrou kvalitou povrchu a složitým konstrukčním tvarem. Takové odlitky se odlévají metodou odlévání pod vysokým nebo nízkým tlakem. Při odlévání pod vysokým tlakem, které se používá pro zinek a jeho slitiny, se tlak vyvolává pístem a jeho velikost je 2 až 50 [MPa]. V praxi se tento způsob nazývá lití pod tlakem. Při odlévání působením nízkého tlaku se tlak vyvolává působením plynného média a nebo vzduchu na hladinu kovu a jeho velikost je 0,03 až 0,5 [MPa], což se nazývá nízkotlaké lití. Při odlévání pod tlakem se používají trvalé formy s kovovými jádry.

2.3.1. Metoda odlévání pod vysokým tlakem

Metoda odlévání pod vysokým tlakem spočívá v tom, že roztavený kov působením vysokého tlaku proudí velkou rychlostí přes vtokovou soustavu do dutin kovové formy, za působení tlaku ve formě tuhne ve tvaru odlitku a po otevření formy se z ní vybírá.

Když se dutina formy vyplní, tlačенý píst se rychle zabrzdí. Kinetická energie systému se přemění na tepelnou energii. Teplota odlévaného kovu stoupá, při čem nastává částečné znovunatavení vznikající mřížky dendritů.

Na překonání odporu tuhnoucího kovu v tenkých průřezích dutiny formy a na překonání odporu plynů uzavřených v tuhnoucím odlitku je potřebný dotlak, který se přenáší od pístu přes vtokový systém na tuhnoucí odlitek. Vlivem dotlaku se přemísťují tekuté části slitiny do „prázdných“ míst v odlitku. Působení dotlaku zaniká ztuhnutím slitiny ve vtokovém zářezu. Proces přenášení dotlaku do dutiny formy se nazývá dodatečné lisování.



Obr. 2-7 Etapy plnění dutiny formy [3]

Pohyb taveniny v plnicí komoře a plnění dutiny formy se dělí na čtyři etapy :

etapa τ_1 – píst uzavře otvor, přes který se plní plnicí komora. Rychlost pohybu pístu je malá, hodnota tlaku je stejně tak malá, protože se překonává jen odpor tření v plnicí komoře;

etapa τ_2 – plnicí komora se naplní až po vtokové zářezy. Rychlost pístu se zvyšuje a nabývá maximální hodnotu, tlak p_2 převyšuje tlak p_1 o hodnotu potřebnou na překonání odporu v této etapě;

etapa τ_3 – vtoková soustava a dutina formy se plní tekutým kovem. V důsledku prudkého škrcení proudu taveniny v zářezu klesá rychlost proudění na hodnotu v_3 a tlak p_3 se zvyšuje (zvyšují se odpory);

etapa τ_4 – v okamžiku zabrzdění pístu nastává v důsledku setrvačných hydraulický náraz, tlak p_4 se prudce zvyšuje. Je to konečný dotlak. Začíná dodatečné lisování.

Plnění dutiny formy při lití pod tlakem má velký vliv na výslednou jakost odlitku. Rychlost vstupu taveniny z plnicí komory dosahuje 0,5 až 120 [m.s⁻¹]. Forma se vyplní v průběhu několika setin sekundy. Formy na velmi tenkostěnné odlitky se vyplňují v průběhu několika tisícín sekund.

Charakter pohybu taveniny v dutině formy závisí na:

- vstupní rychlosti do dutiny formy,
- vzájemném poměru šířek zářezu a odlitku δ_Z a δ_{od} , nebo od jejich ploch S_Z a S_{od} ,
- viskozitě a povrchovém napětí slitiny,

d) tepelných podmínkách, které se vytvoří v důsledku vzájemného působení mezi taveninou a formou.

Všeobecně se rozlišují při vstupní rychlosti. V závislosti od toho i tři způsoby plnění formy:

1. Nízké rychlosti – plnění laminárním proudem - laminární plnění odpovídá vstupním rychlostem taveniny nižším než $0,3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, při čem $\delta_z/\delta_{OD} > 1/2$ až $2/3$. Laminární proudění napomáhá zvýšení hutnosti odlitku na úkor snížení podílu bublin a pórů, protože se vytvářejí vhodné podmínky pro odvzdušnění dutiny formy. Tento způsob je však možné použít jen při výrobě odlitků jednoduché konstrukce ze slitin se širokým intervalem tuhnutí.

2. Střední rychlosti – souvislé turbulentní plnění - při zvýšení vstupní rychlosti taveniny na $0,5$ až $15 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ (u tavenin v kašovitém stavu) narazí tavenina na protilehlou stěnu formy. Přitom se proudící tavenina rozdělí na dvě části, které proudí opačným směrem a jejich pohyb je turbulentní. V důsledku turbulence se v objemu taveniny, která se hromadí při protilehlé stěně do zářezu, zvyšuje množství plynů. Plyny zůstanou v hotovém odlitku ve formě nekovových vměstků různých rozměrů (od $0,1$ do 1 [mm] nebo větší). Plnění dutiny formy souvislým turbulentním prouděním nastává když $S_z/S_{OD} > 1/4$ až $1/2$.

3. Vysoké rychlosti – disperzní plnění - disperzní plnění nastává při vstupní rychlosti taveniny nad 25 až $30 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ a $S_z/S_{OD} < 1/4$ až $1/2$. Proud taveniny narazí velkou rychlostí na protilehlou stěnu formy. Protože je síla nárazu velmi velká, kov se roztříští na velké množství kapek. Kapičky s okolním ovzduším vytvoří disperzní směs. Plyny a vzduch, které se přitom zachytí a zůstanou v odlitku po ztuhnutí vytváří velmi jemnou pórovitost. Čím je rychlost větší (100 až $120 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$), tím je pórovitost jemnější. Takto vzniklé bubliny ovlivňují výsledné vlastnosti odlitku v podstatně menší míře než bubliny, které vznikají při souvislém turbulentním plnění formy. Nevýhodou disperzního plnění formy je velmi vysoký erozivní účinek proudící taveniny na jádro a vliv nárazu na stěny formy. Kromě toho se slitina nalepuje na stěnu formy. Vzhledem k tomu se maximální rychlosti proudění, závislé na druhu odlévání slitiny určují takto: pro Zn - slitiny je maximální rychlost plnění $100 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, pro Mg - slitiny je 50 až $75 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ a pro Al-slitiny je $40 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$. Disperzní plnění se používá zvláště při výrobě tenkostěnných odlitků složité konstrukce.

2.3.2. Krystalizace při lití pod tlakem

Všeobecná teorie krystalizace, tuhnutí kovů a jejich slitin, je založená na termodynamických pochodech. Charakterizuje děj, při kterém dochází v tavenině k tvorbě a růstu krystalizačních zárodků, tento děj se označuje krystalizací. Základními parametry krystalizace je rychlost tvorby zárodků n [$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$] a rychlost jejich růstu v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. Ve vztazích pro popis krystalizace při gravitačním lití pro výpočet těchto parametrů krystalizace (n a v) se nevyskytuje tlak jako fyzikálně důležitá veličina. Naopak, při vysokotlakém lití je tlak jedním z důležitých parametrů, který ovlivňuje jak tvorbu zárodků, tak i jejich růst. Pro výpočet tvorby zárodků lze psát:

$$n = K_1 \cdot \exp\left(-\frac{U}{R.T}\right) \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot \sigma^3}{T \cdot (\Delta T)^2}\right), \quad (2.3)$$

kde značí: K_1 , B - konstanty závislé na stavu materiálu,

U - aktivační energie difúze atomů taveniny v blízkosti zárodků [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$],

σ - povrchové napětí na rozhraní tavenina – zárodek krystalu [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$],

T - teplotu [K],

ΔT - podchlazení taveniny [K],

R - univerzální plynovou konstantu $R = 8,3143$ [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$].

Výpočet rychlosti je možno provést dle vztahu:

$$v = K_1 \cdot \exp\left(-\frac{U}{R.T}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G}{k.T}\right), \quad (2.4)$$

kde značí: ΔG - změnu volné entalpie [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$],

k - Boltzmannovu konstantu $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$].

Pro zárodek, který rovnoměrně roste ve dvou směrech, lze vypočítat rychlost růstu zárodků dvojrozměrný zárodek :

$$v = K_1 \cdot \exp\left(-\frac{U}{R.T}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot S \cdot T_E}{K \cdot T \cdot L \cdot \Delta T}\right), \quad (2.5)$$

ke značí: T_E - rovnovážnou teplotu počátku krystalizace [K],

L - latentní teplo fázové přeměny [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$],

S - plochu styku zárodku s taveninou [m^2].

Účinek tlaku se nejefektivněji projevuje ve stádiu fázové přeměny taveniny na tuhou fázi. Prioritním ukazatelem této fázové přeměny je objemová změna. Kov se může v podchlazeném stavu vyskytovat jako tavenina i pod teplotou likvidu.

Působení tlaku na eliminaci děr je možné zmenšit celkový objem při stejné teplotě do takové míry, že proběhne fázová přeměna. V opačném případě se účinek tlaku projeví tím, že na roztavení takto ztuhlého odlitku jsou potřebné vyšší teploty tavení.

Zvýšení teploty likvidu T_E s tlakem vyjadřuje zákon Clausius – Clapeyrona:

$$\frac{dT_E}{dp} = T_E \cdot \frac{(V_L - V_S)}{L}, \quad (2.6)$$

kde značí: dT/dp – změnu teploty při změně tlaku,

V_L - molový objem tekuté fáze [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$],

V_S - molový objem tuhé fáze [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$].

L - latentní teplo fázové přeměny [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$].

Tento zákon vysvětluje zvýšení teploty likvidu pod účinkem tlaku jako důsledek zmenšení měrného objemu. Mechanismus působení tlaku na proces krystalizace je založen na efektu působení tlaku a teploty. V důsledku působení tlaku dochází k posuvu rovnovážných teplot likvidu T_E a solidu T_S do oblasti vyšších teplot. Vysoký tlak působící na taveninu způsobuje atermální podchlazení taveniny, které ovlivňuje proces krystalizace.

2.3.3. Výhody a nevýhody lití pod tlakem

Výhody lití pod tlakem

Lití pod tlakem je přesné lití, které se nejvíce přibližuje k ideální snaze přímé přeměny základního materiálu na hotový výrobek. Mezi výhody patří :

- a) možnost výroby odlitků s nízkou rozměrovou tolerancí, často bez nutnosti obrábění
- b) hladký povrch odlitků
- c) dobré mechanické vlastnosti odlitků s jemnozrnnou strukturou
- d) možnost výroby tenkostěnných odlitků
- e) nižší náklady na materiál
- f) u odlitků se dají předlévat otvory i velmi malých průměrů s malým dodatečným opracováním

- g) možnost výroby součástí složitých tvarů
- h) lehké použití zalitých vložek a jiných kovů nebo některých nekovových materiálů
- i) větší přesnost odlitků než při odlévání do písku

Nevýhody lití pod tlakem

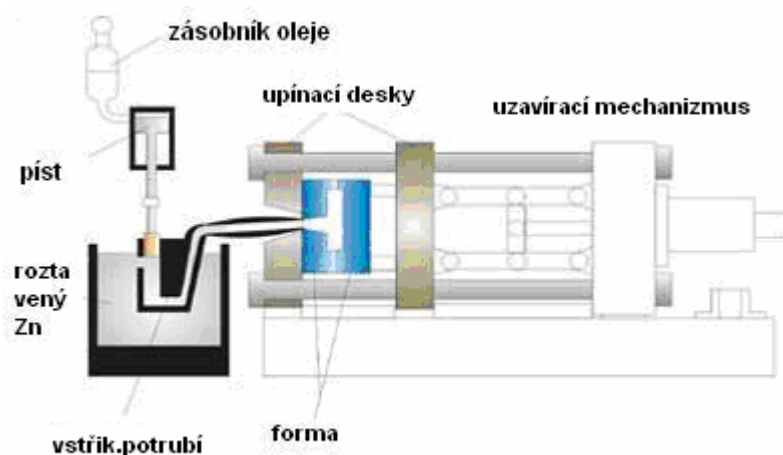
- a) velké náklady na výrobu forem
- b) velké investice na stroje a zařízení
- c) menší tažnost slitin odlitých pod tlakem
- d) vzhledem k možnosti vzniku povrchových bublin nemůže být odlitek odlitý pod tlakem použitý za vyšších teplot, i když je tato teplota pro příslušné slitiny přípustná
- e) maximální velikost odlitku je omezena velikostí stroje
- f) požadavek na určité pracovní zkušenosti

2.3.4. Stroje a zařízení pro odlévání

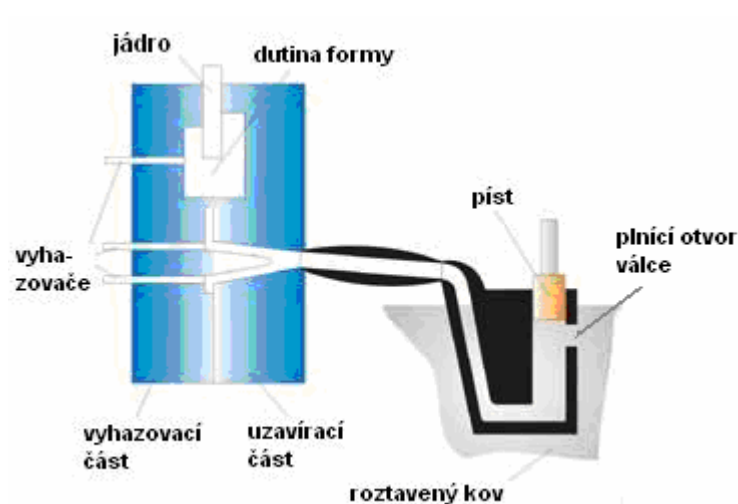
Stroje pro odlévání pod tlakem se dělí podle jejich technologického upořádání, rozlišujeme stroje s vertikální a horizontální tlakovou komorou. Komora u strojů s vertikálním uspořádáním může být teplá a studená.

a) Tlakové stroje s teplou plnicí komorou - jsou používány pro zinek a ostatní slitiny s nízkou teplotou tání, které nenaruší materiál válce a pístu stroje. V tomto procesu válec a píst představující vstřikující mechanismus jsou ponořeny v roztaveném kovu v kelímku, který je součástí stroje.

Princip práce těchto strojů vyplývá z obr. 2-8. Schéma teplé plnicí komory je znázorněn na obr. 2-9.



Obr. 2-8 Schéma tlakového stroje s teplou plnicí komorou



Obr. 2-9 Schéma teplé plnicí komory

Forma je zavřená a posouvající píst plní uzavřenou formu roztaveným kovem. Píst dále stlačuje roztavený kov a drží tak kov pod tlakem ve formě, dokud kov neztuhne. Forma se otvírá a jsou-li použita jádra, tak jsou vytažena. Odlitek zůstává v části formy, kde jsou vyhazovače. Píst se vrací a zbylý roztavený kov teče zpět skrz trysku a plnicí potrubí. Vyhazovače vytlačí odlitek ven z formy. Jakmile píst odkryje plnicí otvor, roztavený kov znovu naplní válec a plnicí potrubí. Proces se opakuje znovu od kroku

Podle způsobu vyvíjení tlaku se tlakové stroje s teplou plnicí komorou rozdělují na:

1) s vertikální plnicí komorou:

s vertikální dělicí plochou formy (obr. 2-10 a),

se šikmou dělicí plochou formy (obr. 2-10 b),

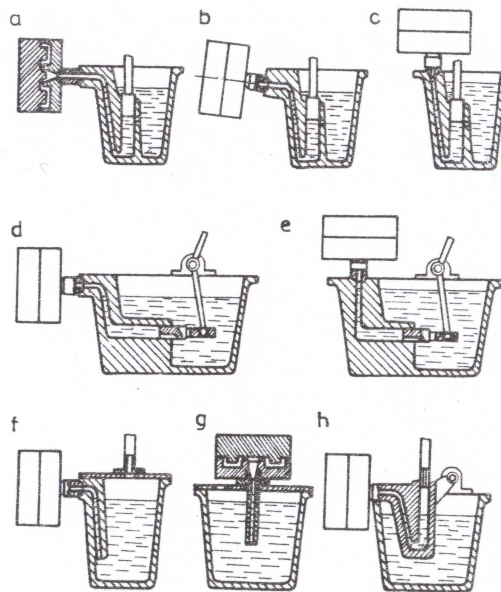
s horizontální dělicí plochou formy (obr. 2-10c).

2) s horizontální plnicí komorou:

s vertikální dělicí plochou formy (obr. 2-10 d),

s horizontální dělicí plochou formy (obr. 2-10 e).

Kompresorové lisy (obr. 2-10 f, g, h) v současnosti nahrazují lisy se studenou plnicí komorou.

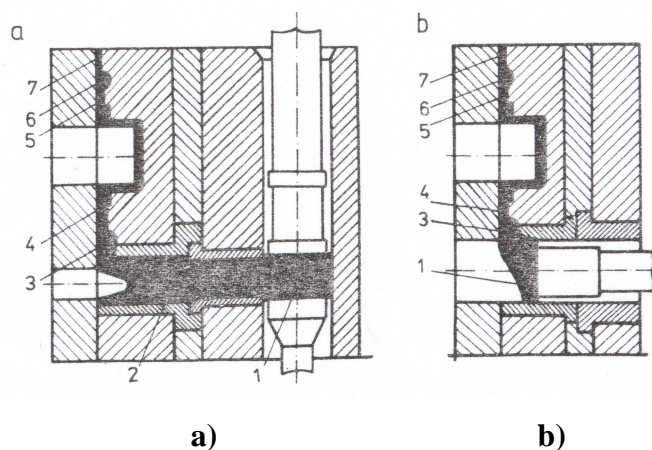


Obr. 2-10 Tlakové stroje s teplou plnicí komorou

b) Tlakové stroje se studenou plnicí komorou - jsou z hlediska používání odlévaných slitin univerzálnější. Při tlakovém lití slitin zinku s 8, resp. 12 % Al je možno používat stroje s teplou i studenou tlakovou komorou. Nehrozí nalepování odlitků nebo reakce kovu s formou. Slitiny Zn - Al 27 (27 % hliníku) mají již poněkud vyšší lící teplotu, při které může docházet ke kontaminaci železem z formy. Proto se doporučuje odlévat na strojích se studenou komorou, u nichž je teplota forem nižší. Odlévají se v nich i ocelové odlitky. Podle způsobu vyvíjení tlaku se tlakové stroje se studenou plnicí komorou rozdělují na:

1) pístové lisy s vertikální plnicí komorou (obr. 2-11 a)

2) pístové lisy s horizontální plnicí komorou (obr. 2-11 b)



a) – pro vertikální plnicí komoru, **b)** – pro horizontální plnicí komoru

1 – lisovací zbytek, 2 – vtokový kanál, 3 – rozvodný kanál, 4 – zářez, 5 – spojovací kanál,
6 – přetoková jamka, 7 – odvzdušňovací kanál

Obr. 2-11 Typy vtokových soustav pro oba základní způsoby vysokotlakého lití

Výhody strojů s teplou komorou ve srovnání se stroji se studenou komorou:

- a) rychlý cyklus (pro miniaturní zinkové součásti kolem 1 vteřiny),
- b) kontrola teploty kovu, lepší tekutost umožňuje lepší plnění formy, díky nižším tlakům nižší namáhání stroje, u odlévání tenkostěnných odlitků,
- c) dávkovací válec se plní automaticky, což zkracuje délku cyklu,
- d) roztavený kov méně oxiduje.

Nevýhody strojů s teplou komorou ve srovnání se stroji se studenou komorou

- a) omezení ve výběru slitiny,
- b) díky nižším tlakům a rychlosti cyklu mohou mít odlitky menší hustotu,
- c) vyšší náklady na údržbu.

2.3.5. Méně obvyklé metody tlakového lití

a) Vakuování formy a plnicí komory - použitím vakua při tomto způsobu odlévání vznikají další výhody, jako např. zmenšení tloušťky stěny odlitku o 30 až 40 %, zvýšení mechanických vlastností (hlavně tažnosti) o 1,5 až 2 krát, zlepšení kvality povrchu, možnost použití tepelného zpracování, snížení zmetkovitosti na 1 % oproti 5 až 10 % u odlévání při normálním tlaku, snížení tlaku při plnění dutiny formy asi o 50 % při zachování času lití a času celého pracovního cyklu. Charakteristickým rysem klasifikace rozlišných konstrukcí vakuových soustav je místo odsávání vzduchu (přímo z formy, z komory, ve které se nachází forma, z formy a z plnicí komory).

b) Acurad proces - pro maximální využití příznivého účinku dodatečného lisování vyvinula firma General Motors (USA) nový způsob tlakového lití, známý pod názvem Acurad-proces. Jedinečností tohoto způsobu je použití dvou lisovacích pístů – vnějšího a vnitřního. Dodatečné lisování umožňuje výrobu odlitků bez staženin, bez rozptýlených pórovitostí a bez bublin.

c) Tlakové lití s použitím kyslíku - podstatou kyslíkového tlakového lití je nahrazování vzduchu a plynu, které se nacházejí ve formě a v plnicí komoře, kyslíkem.

2.4. Vlastnosti odlitků odlévaných metodou lití pod tlakem

2.4.1. Technologické vlastnosti pro lití pod tlakem

Lití pod tlakem je metoda velmi odlišná od gravitačního lití, tak že nelze posuzovat technologickou vhodnost materiálu podle běžných slévarenských vlastností.

a) Teplota tuhnutí - na teplotu tuhnutí mají vliv přísady a má největší vliv na volbu teploty lití.

b) Tepelný obsah slitiny - vzhledem k rychlému odvodu tepla formou a nebezpečí předčasného ztuhnutí tenké stěny odlitku má velký význam množství tepla, které je třeba odvést stěnou formy až do ztuhnutí odlitku. U lití pod tlakem velmi záleží na množství tepla, které se odvádí v teplotním intervalu mezi teplotou lití a koncem teploty tuhnutí.

c) Teplotní interval tuhnutí - u lití pod tlakem jsou dva činitele, kterými lze působit proti vlivu příliš velkého teplotního intervalu tuhnutí stejně jako proti příliš malému tepelnému obsahu slitiny v intervalu lící teploty a teploty konce tuhnutí. Jsou to vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost.

d) Tepelná vodivost - uplatňuje se především, až když je slitina tak ztuhlá, že je z ní teplo odváděno jejím prouděním uvnitř odlitku. Největší je u čistých kovů, nejmenší u slitin, které tvoří roztoky. Největší vliv mají nejmenší přísady.

e) Viskozita a povrchové napětí - při lití pod tlakem viskozita a povrchové napětí nejsou tak důležité jako u lití gravitačního.

g) Obsah plynů v roztavené slitině - u všech tavenin, které plyny obsahují, dochází k výraznému zmenšení jejich rozpustnosti ve slitině při vlastním tuhnutí. Tuhnou-li slitiny rychle, zůstává ve slitině rozpuštěno i v tuhém stavu více plynů než při tuhnutí pomalém. U slitin pro lití pod tlakem je třeba pečlivě kontrolovat naplynění.

h) Objemové změny při tuhnutí a chladnutí – objemové změny při tuhnutí a chladnutí jsou výsledkem fyzikálních vlastností slitiny a technologických vlivů. Mezi fyzikální vlastnosti patří objemové kontrakce při chladnutí v roztaveném stavu, objemové změny při vlastním tuhnutí a objemové kontrakce při chladnutí v tuhém stavu. Mezi technologické vlivy patří zejména rychlost a postup chladnutí a tuhost formy.

i) Stahování - stahování je způsobeno hlavně objemovou kontrakcí v kapalném stavu a při tuhnutí. Roste proto při konstantní střední teplotě formy s lící teplotou taveniny. U lití pod tlakem není možné nálitkovat, jako u lití gravitačního, vyjímaje do jisté míry působení dotlaku. Proto je zde nutné respektovat, že u odlitků litých pod tlakem nebude vnitřek stěn bez pórů, dutinek a ředin, k jejichž vzniku může přispívat nedokonalé odvzdušnění a naplynění. Nejúčinnějším prostředkem proti stahování je co nejnižší lící teplota, které lze při lití pod tlakem nejlépe dosáhnout.

j) Smrštění - smrštění závisí v hlavní míře z fyzikálních vlastností především přímo na tepelné roztažnosti slitiny v tuhém stavu. Čím je menší koeficient tepelné roztažnosti

v intervalu teplot solidu a vyhození odlitku z formy, tím je výhodnější slitina z hlediska všech nepříznivých vlivů smrštění. Koeficient teplotní roztažnosti vzrůstá s teplotou pravidelně. Smrštění je nepřímo ovlivněno vysokou lící teplotou, zvýší – li se teplota kovové formy. Zpomalí se jím vytvoření těsné povrchové vrstvy a zmenší se tím smrštění. Velký význam má také tuhost kovových forem a jader, která smršťování zabraňují.

k) Mechanické vlastnosti za vyšších teplot - v souvislosti s tím, že kovová forma brání smrštění, vzniká zde podmínka, že pro lití pod tlakem se mohou uplatnit jen ty slitiny, které mají v tuhém stavu, ale za vysokých teplot blízko teploty tuhnutí dostatečnou pevnost, nejsou křehké a snesou plastickou deformaci. Této podmínce všechny slitiny nevyhovují, proto je výběr slitin pro lití pod tlakem značně omezen. Čím je v tomto směru slitina choulostivější, tím musí být odlitek jednodušší.

l) Chemické chování slitin ke kovu formy - je nutné dbát na to, v jaké míře je slitina netečná k účinným částem stroje a k formě. Toto chemické namáhání bylo jednou z příčin zavedení strojů se studenou komorou pro lití hliníkových slitin, které rozpouštějí železo.

m) Možnost tepelného zpracování - tepelné zpracování přichází v úvahu za nižších teplot. Odlitek litý pod tlakem, má vlivem rychlého ochlazení kovu v kovové formě, značné vnitřní pnutí.

n) Možnost přetavování – o použitelnosti slitin rozhoduje také to, do jaké míry lze vadný materiál znovu přetavit.

2.4.2. Užité vlastnosti odlitků ze slitin zinku

a) Mechanické vlastnosti - mechanické vlastnosti závisí na tom, do jaké míry je možné zabránit pórovitosti vnitřních stěn. Protože poměr povrchových vrstev stěny v poměru k celkové tloušťce stěny je tím menší, čím je větší tloušťka stěny, je nutné počítat se značným poklesem pevnosti slitin zinku. Pevnost závisí i na jakosti vnitřní vrstvy a ta závisí na mnoha technologických činitelích, kteří se dají charakterizovat hustotou. Pro zjištění mechanických vlastností je potřeba normalizovat zkušební tyč, přičemž lící podmínky (teplota lití, teplota formy, vstřikovací rychlost a tlak) mohou mít značný vliv.



b) Objemová hmotnost - hotového odlitku je třeba hovořit o objemové váze, která je vždy menší než hustota. Poměr objemové váhy k hustotě záleží na vnitřní pórovitosti. Lze dosáhnout i 95%, ale už od 90% lze mluvit o dobré jakosti odlitku.

Výběr slitin na základě technologických a užitkových vlastností

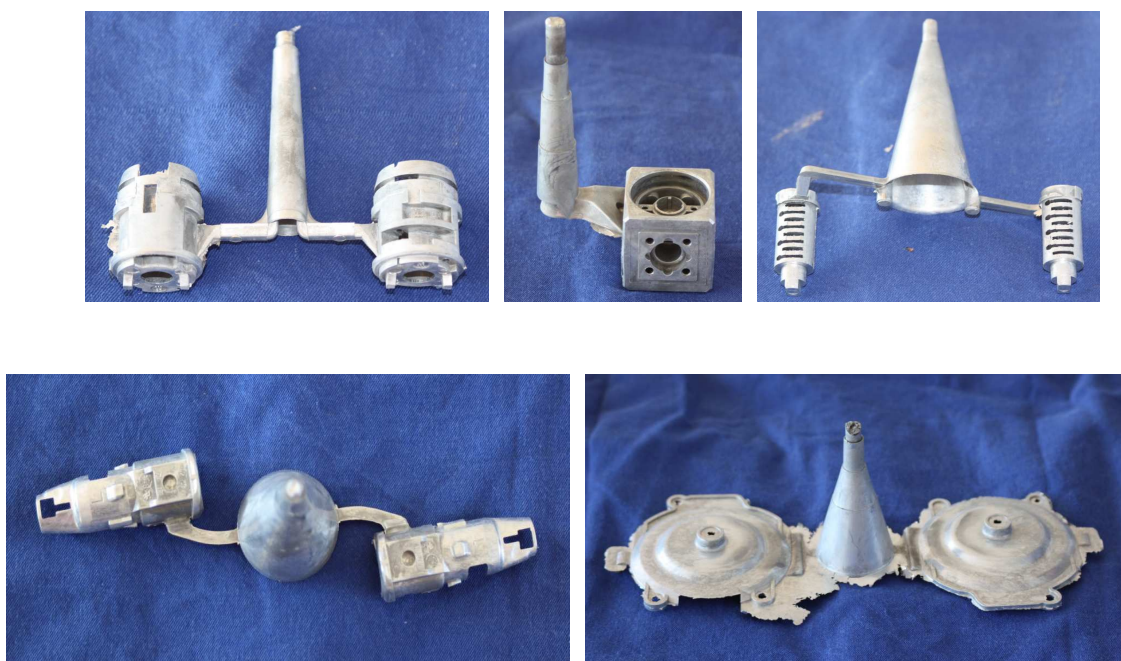
Z uvedeného přehledu vyplývá, že na slitiny, které jsou lité pod tlakem, jsou kladeny velké nároky. Proto tomuto výběru vyhovuje mnohem méně slitin, než např. pro lití do písku nebo do kokil.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Účelem experimentální části této práce bylo sledování charakteru krystalizace, resp. tvaru krystalů při odlévání vybraných slitin zinku vysokotlakým způsobem. Další součástí sledovaných experimentů bylo měření tvrdosti takto vyrobených odlitků ze slitin zinku.

Pro vyhodnocení krystalů v různých tloušťkách stěn odlitků bylo použito od každé série 5 odlitků, které byly ze slitin zinku ZnAl4Cu1 (ZAMAK 410) s nízkou teplotou tavení 380 až 385 [°C] a litím při tlaku 20 a 30 [MPa]. Tepelně-fyzikální vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tab. 3.1 ve srovnání s čistým zinkem. Na rozdíl od slitin kovů je výhodou čistého kovu jeho tuhnutí při jedné teplotě, a tím lze určit jeho dobu tuhnutí. Chemické složení slitiny je uvedeno v tab. 3.2.

Na obr. 3-1 jsou uvedeny odlitky ze slitiny zinku, které byly podrobeny ke sledování krystalizace.



Obr. 3-1 Ukázky odlitků ze slitin zinku vyráběné vysokotlakým litím

Tab. 3.1. Tepelně fyzikální vlastnosti odlévaných kovů (pro srovnání uvedeny i vlastnosti čistého zinku).

Vlastnost	ZAMAK 410	čistý Zn
Hustota [kg.m ⁻³]	6700	7130
Střední izobar. součinitel délkové roztažnosti (20-100°C) [K ⁻¹]	27,4.10 ⁻⁶	29.10 ⁻⁶
Střední měrné teplo (20-100°C) [J.kg ⁻¹ . K ⁻¹]	400	385
Střední měrná tepelná vodivost (70-140°C) [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]	109	110
Skupenské teplo tání [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]	-	100860

Tab. 3.2. Chemické složení použitých slévárenských materiálů (hmotnostní %).

Materiál	Al	Cu	Mg	Fe max	Cd+Pb max	Sn max
ZAMAK 410	3,9-4,3	0,75-1,25	0,02-0,05	0,075	0,009	0,001

3.1. Charakteristika výroby odlitků ze slitin zinku

3.1.1. Příprava taveniny pro tlakové lití zinku

Příprava taveniny pro tlakové lití byla provedena v plynové tavící peci, viz obr. 3-2. Plynová tavící pec je obvyklé konstrukce (kostra pece je tvořena silným ocelovým plechem skrouženým do válce. Vyzdívku pece tvoří kombinace vysokoteplotních izolačních materiálů, lehčených šamotových cihel a vláknitých tepelně izolačních rohoží a desek. Uvnitř pece je usazen kelímek, jenž je fixován proti posunutí. Na jedné straně pece je umístěn plynový hořák, jenž zajišťuje tangenciální proudění spalin okolo kelímku a tím přenáší teplo do vsázky. Na konci výstupu spalin je vyústění, které se napojuje na komín).

Technické parametry pece jsou v příloze č. 1.



Obr. 3-2 Plynová tavící pec

3.1.2. Stroj s teplou lící komorou Frech DAW 50

Sledované odlitky byly vyrobeny na stroji Frech DAW 50 s teplou plnicí komorou. Byla použita uzavírací síla 55 [kN]. Průměr pístu tlakového stroje činil 50 [mm], dotlak stroje při vyplnění formy taveninou činil 20 a 30 [MPa]. Formy pro odlévání jednotlivých typů odlitků byly vyrobeny z nástrojové ocele ČSN 19 552.4. Temperování formy bylo prováděno na zařízení Thermocast (chladicí médium olej). Rozměry forem byly: 390 x 546 x 298 [mm]. Pracovní povrch formy byl ošetřen nástřikem na bázi vodního skla a grafitu. Technické parametry pracovního stroje jsou uvedeny v příloze č. 2.



Obr. 3-3 Stroj s teplou lící komorou Frech DAW 50.

Odlitky ze slitiny ZAMAK 410 (ZnAl4Cu1) byly odlity do temperované, resp. předeřáté kovové slévárenské formy. Teplota formy činila 190 [°C]. Teplota lití se pohybovala v úzkém intervalu $t_L = 470 \pm 10$ [°C].

3.2. Hodnocení krystalizace odlitků ze slitin zinku

Hodnocení charakteru krystalizace slitin zinku bylo provedeno pomocí světelného mikroskopu. Z příslušných, tlakově vyrobených odlitků ze slitin zinku, byly mechanicky odřezány části odlitku a to z míst, kde se předpokládala odlišná struktura nebo vznik porózy. K tomuto účelu vzorky byly připraveny běžným metalografickým způsobem (vzorky pro metalografické pozorování byly zality do plastické hmoty, dále broušeny, leštěny a leptány). Leptadlo bylo roztokem oxidu chromového (200 [g]), síranu sodného (7 [g]), fluoridu sodného (2 [g]) a destilované vody (1000 [ml]). Leptání trvalo krátkou dobu, nepřesáhlo dobu 15 sekund. Po naleptání byl vzorek opláchnut roztokem oxidu chromového (200 [g]) a destilované vody (1000 [ml]). Struktura byla sledována pomocí mikroskopu **NEOPHOT 21 – (výrobce CARL ZEISS JENA)** a vyhodnocena pomocí softwaru LUCIA.5 (od firmy Laboratory Imaging) při zvětšení 100 a 500 násobném.

Ze sledované struktury byla vyhodnocována velikost plochy útvarů tuhého roztoku beta (krystalizace tuhého roztoku zinku s hliníkem). Určení velikosti ploch bylo stanoveno pomocí softwaru LUCIA metou tzv. „transformace prahování objektů“. Je založena na tom, že každá fáze je v obraze zobrazena v různém stupni šedi. Transformace prahování umožňuje vybrat v měřené ploše jednotlivé plochy fáze podle její intenzity šedi a následně pomocí korekcí upravit tak, aby byla v obraze mapována měřená fáze. Zmapované plochy lze vyhodnotit tak, že jsou softwarem nahrazeny plochou kruhu a je určen průměr kruhu, který je označován jako tzv. „ekvivalentní průměr plochy“. Prahování je naznačeno na obr. 3-6. Podíly tuhého roztoku β jsou vyznačeny žlutou barvou. Ekvivalentní průměr plochy primární β -fáze byl vyhodnocen jako průměrná hodnota počtu vybraných zástupců ve sledované ploše.

K tomuto účelu bylo použito 5 zkoumaných odlitků, ze kterých byly připraveny vzorky pro metalografické pozorování. U každého vzorku byla zkoumána struktura jak ve slabší, tak v jeho tlustší partii.

3.2.1. Popis a hodnocení vzorků

Odlitek č. 1

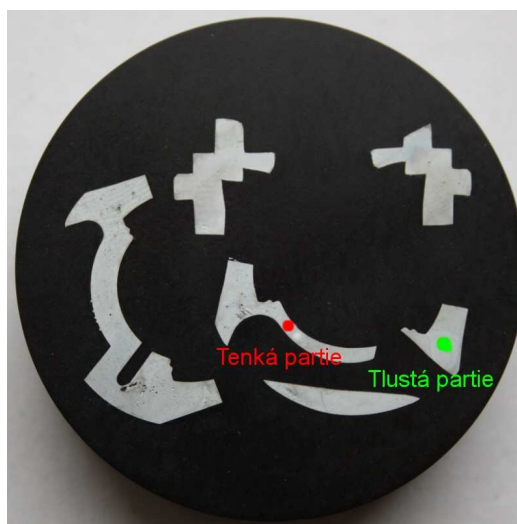
Materiál: ZnAl4Cu1

Lití při tlaku: 30MPa

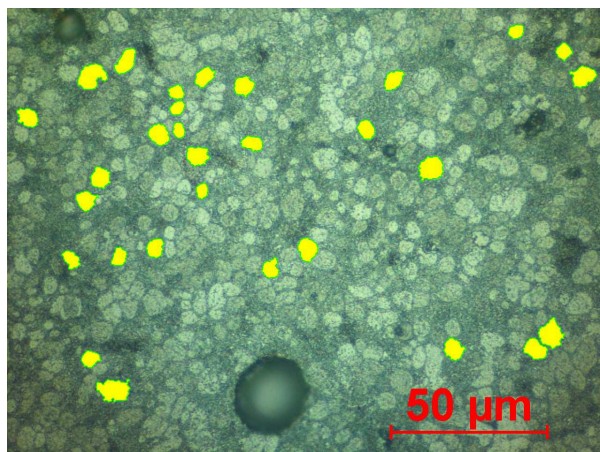


Obr. 3-4 Odlitek č. 1

Na obr. 3-5 je uveden metalografický vzorek s vyznačením míst, kde bylo provedeno metalografické pozorování. Na obr. 3-6 je uvedena struktura tenké partie vzorku č. 1, s vyznačením sledovaných plošek krystalizace odlitku. Na obr. 3-7 je struktura tlustší partie vzorku č. 1. V tabulce 3.3 a 3.4 jsou uvedeny hodnoty sledovaných veličin v tenké a tlusté partii odlitku č. 1.



Obr. 3-5 Metalografický vzorek, odlitek č.1

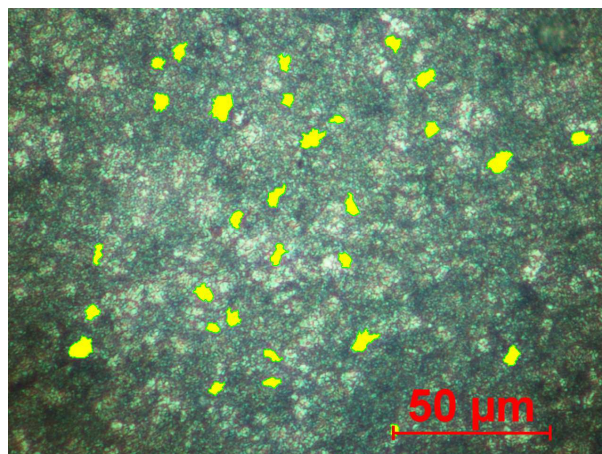


Obr. 3-6 Struktura vzorku č. 1, tenká partie

Tabulka 3.3 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	1,5	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózy [μm^2]	348	-
Kruhovitost	0,66	0,12
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	5,06	1,02
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	20,93	0

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 1,5 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózy 348 [μm^2], kruhovitost 0,66, ekvivalentní průměr plochy zrna 5,06 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 20,93 [μm^2].



Obr. 3-7 Struktura vzorku č. 1, tlustá partie

Tabulka 3.4 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	4	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha poróznosti [μm^2]	160	-
Kruhovitost	0,78	0,13
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	6,19	1,08
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	31,11	10,90

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 4 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha poróznosti 160 [μm^2], kruhovitost 0,78, ekvivalentní průměr plochy zrna 6,19 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 31,11 [μm^2].

Světlé oblasti na obr. 3-6 a 3-7 jsou krystaly β fáze (tuhý roztok hliníku v zinku) a tmavé partie odpovídají eutektiku ($\alpha_1 + \beta$), viz rovnovážný diagram na obr. 2-3.

Odlitek č. 2

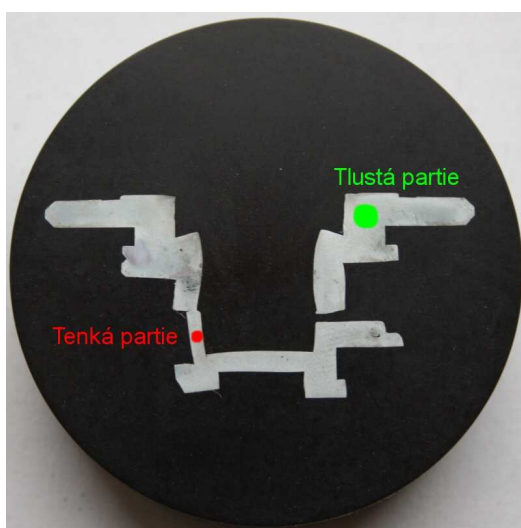
Materiál: ZnAl4Cu1

Lití při tlaku: 20MPa

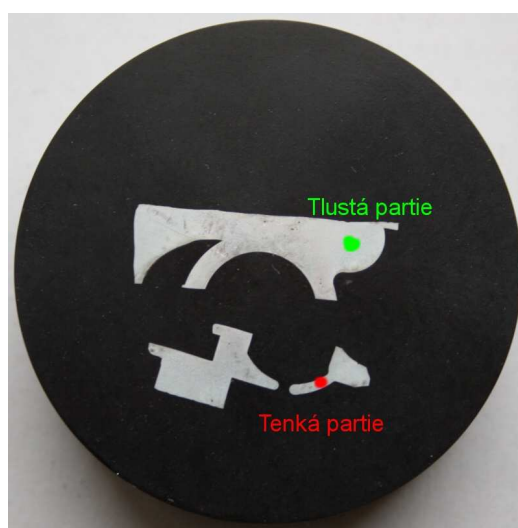


Obr. 3-8 Odlitek č.2

Na obr. 3-9 jsou uvedeny metalografické vzorky s vyznačením míst, kde bylo provedeno metalografické pozorování. Na obr. 3-10 a 3-12 je uvedena struktura tenké partie vzorku č. 2A a 2B, s vyznačením sledovaných plošek krystalizace odlitku. Na obr. 3-11 a 3-14 je struktura tlustší partie vzorku č. 2A a 2B. Na obr. 3-13 struktura střední partie. V tabulce 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 jsou uvedeny hodnoty sledovaných veličin v tenké, střední a tlusté partii odlitku č. 2.

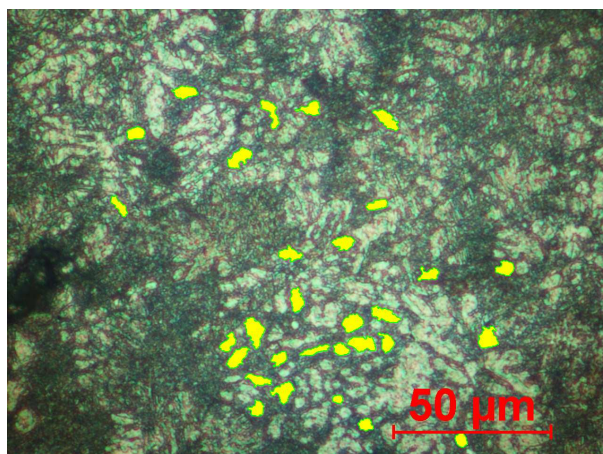


a)



b)

Obr. 3-9 Metalografický vzorek, odlitek a) č.2A a b) č.2B

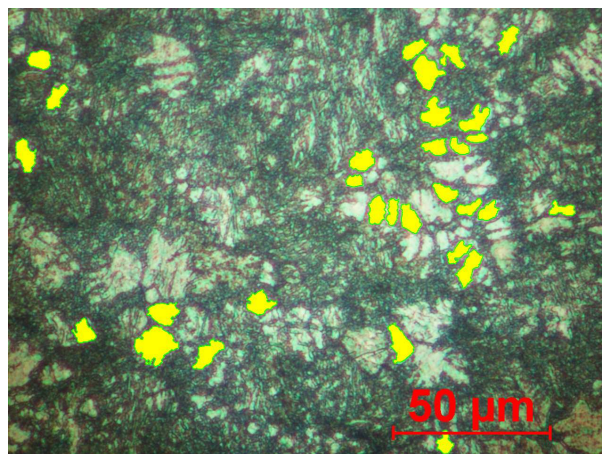


Obr. 3-10 Struktura vzorku č. 2A, slabá partie

Tab. 3.6 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	1,5	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózity [μm^2]	242	-
Kruhovitost	0,63	0,13
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	5,32	0,83
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	22,73	0

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 1,5 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózity 242 [μm^2], kruhovitost 0,63, ekvivalentní průměr plochy zrna 5,32 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 22,73 [μm^2].

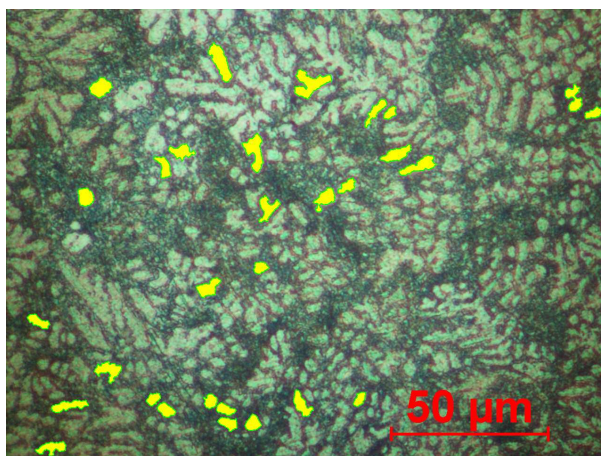


Obr. 3-11 Struktura vzorku č. 2A, tlustá partie

Tab. 3.7 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	3	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózy [μm^2]	661	-
Kruhovitost	0,59	0,11
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	6,96	1,43
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	39,62	17,54

Na obr. 3-9 je metalografický vzorek z odlitku č. 2, který byl podroben k hodnocení mikrostruktury. Z tohoto vzorku je patrné, že v tlustších partiích jsou méně výrazné póry, které odpovídají, jak miktostaženinám, plynovým bublinám, tak porózitě. Dutiny protáhlého tvaru odpovídají miktostaženinám. Podobně byla sledována poróza ve tvaru rovnoosých dutin, které jsou způsobeny kombinací plynu a miktostaženin. Výrazně kulatý tvar dutin vykazují plynové bubliny. Všechny tyto póry byly sledovány mikroskopem, ale nebyla jim věnována taková pozornost, jako sledované krystalizaci. Světlé oblasti na obr. 3-10 a 3-11 jsou krystaly β fáze (tuhý roztok hliníku v zinku) a tmavé partie odpovídají eutektiku ($\alpha_1 + \beta$), viz rovnovážný diagram na obr. 2-3. Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 3 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózy 661 [μm^2], kruhovitost 0,59, ekvivalentní průměr plochy zrna 6,96 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 39,62 [μm^2].

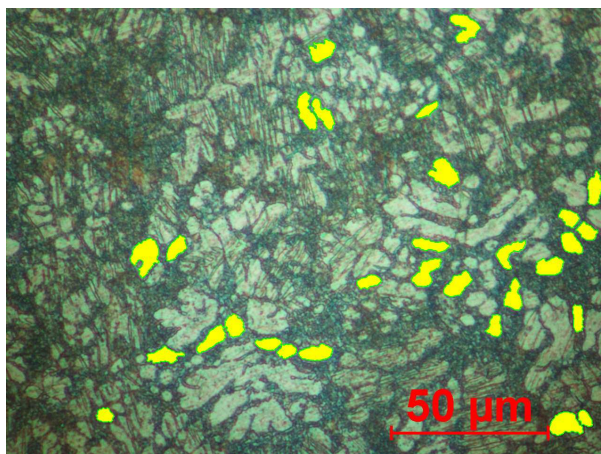


Obr. 3-12 Struktura vzorku č. 2B, slabá partie

Tab. 3-9 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	1	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózity [μm^2]	302	-
Kruhovitost	0,60	0,17
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	5,49	1,09
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	24,58	10,03

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 1 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózity 302 [μm^2], kruhovitost 0,60 , ekvivalentní průměr plochy zrna 5,49 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 24,58 [μm^2].

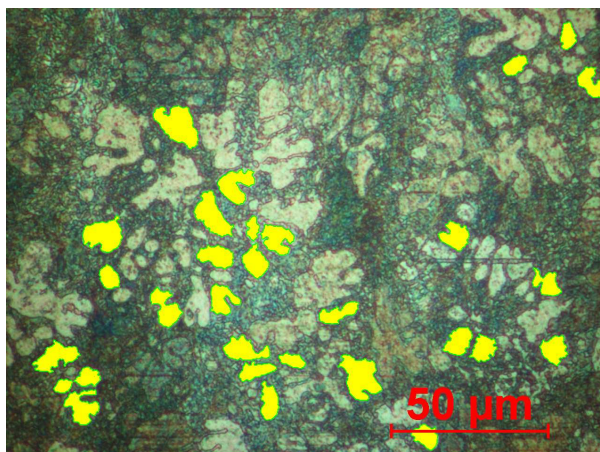


Obr. 3-13 Struktura vzorku č. 2B, střední partie

Tab. 3.10 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	3	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózy [μm^2]	262	-
Kruhovitost	0,65	0,11
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	6,71	1,15
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	36,38	12,38

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 3 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózy 262 [μm^2], kruhovitost 0,65, ekvivalentní průměr plochy zrna 6,71 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 36,38 [μm^2].



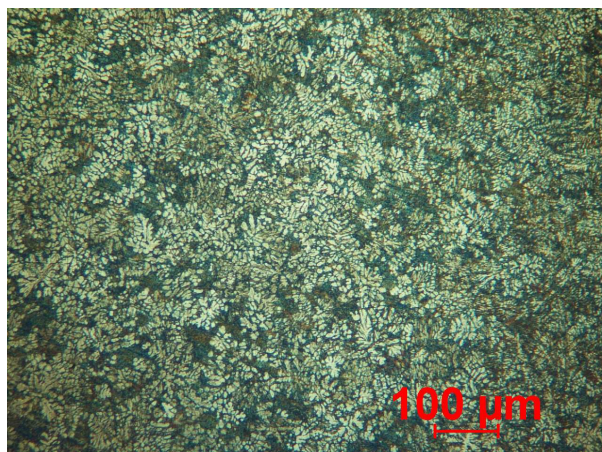
Obr. 3-14 Struktura vzorku č. 2B, tlustá partie

Tab. 3.11 Přehled hodnocených veličin na odlitku

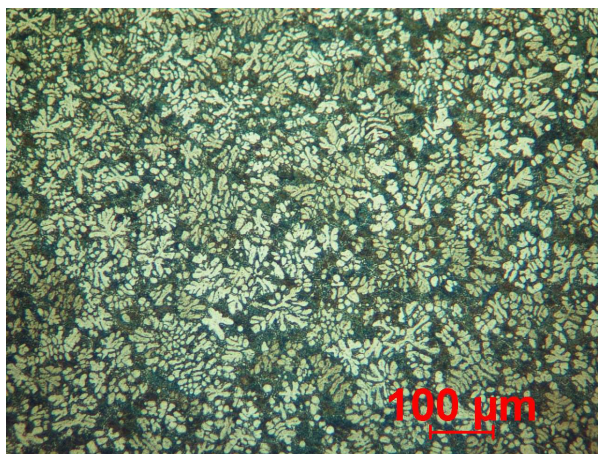
Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	5	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózy [μm^2]	148	-
Kruhovitost	0,57	0,14
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	8,51	1,80
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	59,39	25,12

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 4 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózy 148 [μm^2], kruhovitost 0,57, ekvivalentní průměr plochy zrna 8,51 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 59,39 [μm^2].

Světlé oblasti na obr. 3-12, 3-13 a 3-14 jsou krystaly β fáze (tuhý roztok hliníku v zinku) a tmavé partie odpovídají eutektiku ($\alpha_1 + \beta$), viz rovnovážný diagram na obr. 2-3.



Obr.3-15 Struktura vzorku č. 2A v tlusté partii při zvětšení 100násobném



Obr.3-16 Struktura vzorku č. 2B v tlusté partii při zvětšení 100 násobném

Pro popis dendritické struktury je kritériem vzdálenost sekundárních os dendritů, označována jako DAS (dendrite arm sparing). Hodnoty byly zjištěny pomocí softwaru LUCIA.5. Zkoumané vzorky č. 2A a 2B v tlustých partiích měli znatelný vznik dendritů, proto na obr. 3-15 je vzorek č. 2A při 100 násobném zvětšení a na obr. 3-16 vzorek č. 2B při 100násobném zvětšení. Tato struktura byla použita pro zjištění hodnoty DAS v softwaru LUCIA.5. Měřeno bylo u každé struktury 7 dendritů.

Vzorek č. 2A: $DAS = 15,81 \mu m$

Vzorek č. 2B: $DAS = 17,79 \mu m$

Odlitek č. 3

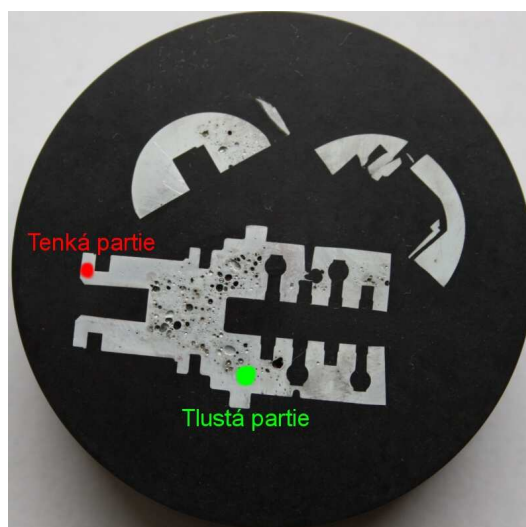
Materiál: ZnAl4Cu1

Lití při tlaku: 20MPa

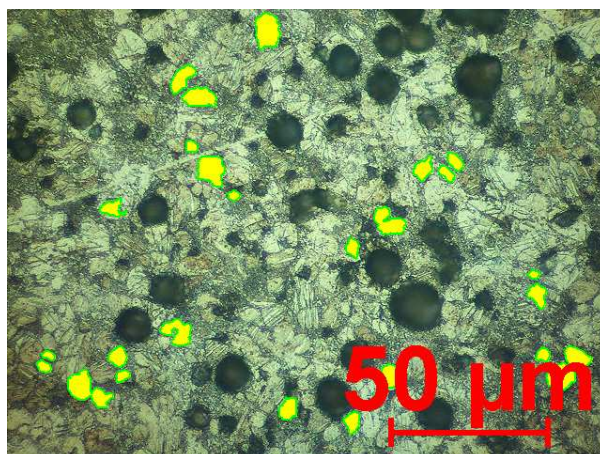


Obr. 3-17 Odlitek č.3

Na obr. 3-18 je uveden metalografický vzorek s vyznačením míst, kde bylo provedeno metalografické pozorování. Na obr. 3-19 je uvedena struktura tenké partie vzorku č. 3, s vyznačením sledovaných plošek krystalizace odlitku. Na obr. 3-20 je struktura tlustší partie vzorku č. 3. V tabulce 3.12 a 3.13 jsou uvedeny hodnoty sledovaných veličin v tenké a tlusté partii odlitku č. 3.



Obr. 3-18 Metalografický vzorek, odlitek č.3



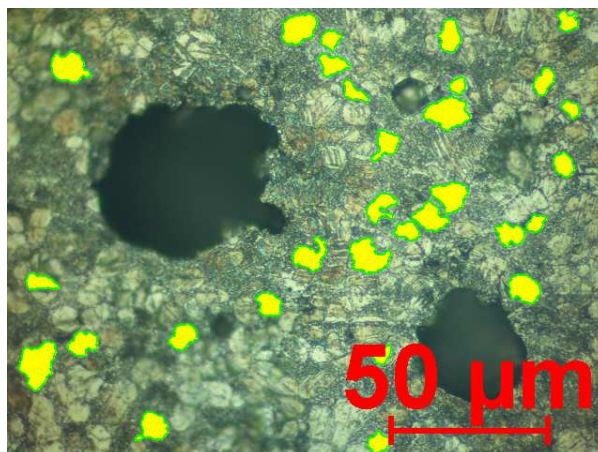
Obr. 3-19 Struktura vzorku č. 3, slabá partie

Tab. 3.12 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	1,5	-
Počet objektů	27	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha poróznosti [μm^2]	8160	-
Kruhovitost	0,77	0,15
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	6,33	2,02
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	34,72	21,50

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 1,5 [mm] při sledování 27 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha poróznosti 8160 [μm^2], kruhovitost 0,77, ekvivalentní průměr plochy zrna 6,33 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 34,72 [μm^2].

Světlé oblasti na obr. 3-19 a 3-20 jsou krystaly β fáze (tuhý roztok hliníku v zinku) a tmavé partie odpovídají eutektiku ($\alpha_1 + \beta$), viz rovnovážný diagram na obr. 2-3.



Obr. 3-20 Struktura vzorku č. 3, tlustá partie

Tab. 3.13 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	6	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózy [μm^2]	7136	-
Kruhovitost	0,74	0,12
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	8,16	1,88
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	51,11	25,56

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 6 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózy 7136 [μm^2], kruhovitost 0,74, ekvivalentní průměr plochy zrna 8,16 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 51,11 [μm^2].

Jak je z obr. 3-18 zřejmé, tento typ odlitku (těleso zámku dveří automobilů) obsahuje velké množství pórů. Některé jsou protáhlého tvaru, jiné kulaté. Dutiny protáhlého tvaru odpovídají mikrostaženinám, je patrné i z obr. 3-18. Ty byly také identifikovány na mikroskopu, viz obr. 3-20. Podobně byla sledována poróza ve tvaru rovnoosých dutin, které jsou způsobeny kombinací plynu a mikrostaženin. Výrazně kulatý tvar dutin vykazují plynové bubliny, viz obr. 3-19.

Odlitek č. 4

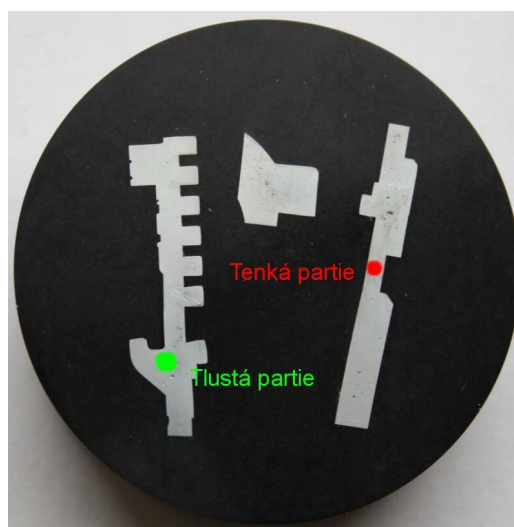
Materiál: ZnAl4Cu1

Lití při tlaku: 30MPa

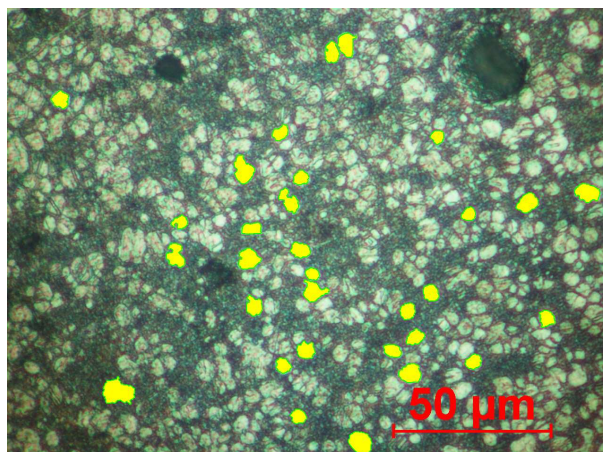


Obr. 3-21 Odlitek č.4

Na obr. 3-22 je uveden metalografický vzorek s vyznačením míst, kde bylo provedeno metalografické pozorování. Na obr. 3-23 je uvedena struktura tenké partie vzorku č. 4, s vyznačením sledovaných plošek krystalizace odlitku. Na obr. 3-24 je struktura tlustší partie vzorku č. 4. V tabulce 3.14 a 3.15 jsou uvedeny hodnoty sledovaných veličin v tenké a tlusté partii odlitku č. 4.



Obr. 3-22 Metalografický vzorek, odlitek č.4

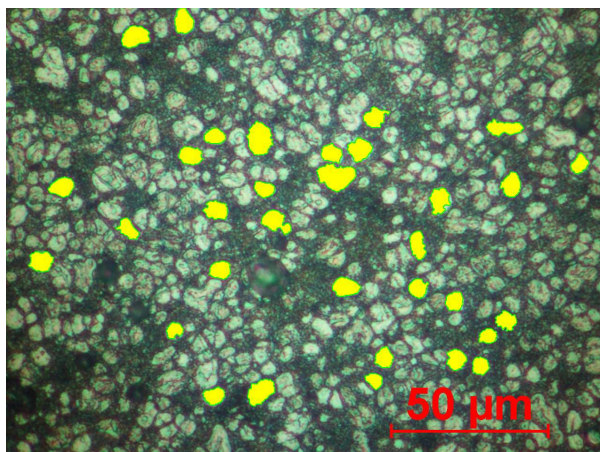


Obr. 3-23 Struktura vzorku č. 4, tlustá partie

Tab. 3.14 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	1,8	-
Počet objektů	31	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózy [μm^2]	480	-
Kruhovitost	0,79	0,15
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	6,33	2,02
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	34,72	21,50

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 1,8 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózy 480 [μm^2], kruhovitost 0,79, ekvivalentní průměr plochy zrna 6,33 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 34,72 [μm^2].



Obr. 3-24 Struktura vzorku č. 4, tlustá partie

Tab. 3.15 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	5	-
Počet objektů	33	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózity [μm^2]	608	-
Kruhovitost	0,79	0,10
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	6,67	1,04
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	35,8	11,83

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 5 [mm] při sledování 33 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózity 608 [μm^2], kruhovitost 0,79, ekvivalentní průměr plochy zrna 6,67 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 35,8 [μm^2].

Světlé oblasti na obr. 3-23 a 3-24 jsou krystaly β fáze (tuhý roztok hliníku v zinku) a tmavé partie odpovídají eutektiku ($\alpha_1 + \beta$), viz rovnovážný diagram na obr. 2-3.

Odlitek č. 5

Materiál: ZnAl4Cu1

Lití při tlaku: 20MPa

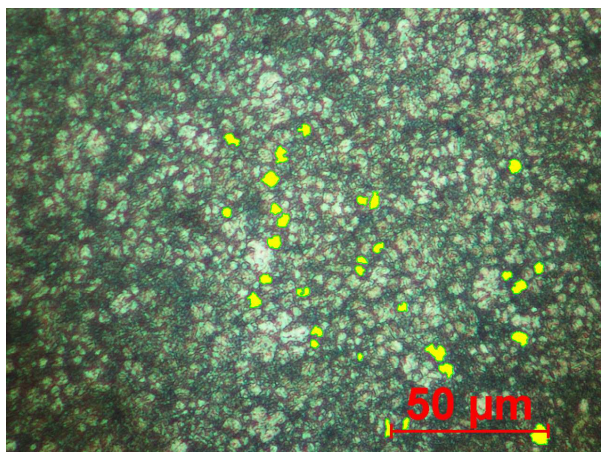


Obr. 3-25 Odlitek č.5

Na obr. 3-26 je uveden metalografický vzorek s vyznačením míst, kde bylo provedeno metalografické pozorování. Na obr. 3-27 je uvedena struktura tenké partie vzorku č. 5, s vyznačením sledovaných plošek krystalizace odlitku. Na obr. 3-28 je struktura tlustší partie vzorku č. 5. V tabulce 3.16 a 3.17 jsou uvedeny hodnoty sledovaných veličin v tenké a tlusté partii odlitku č. 5.



Obr. 3-26 Metalografický vzorek, odlitek č.5

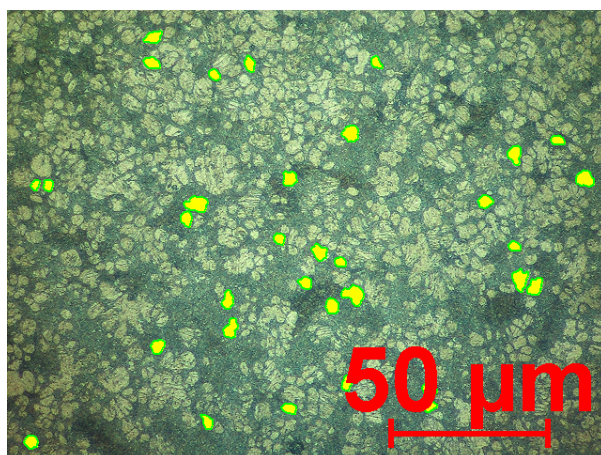


Obr. 3-27 Struktura vzorku č. 5, slabá partie

Tab. 3.16 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	1	-
Počet objektů	30	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha poróznosti [μm^2]	426	-
Kruhovitost	0,79	0,12
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	3,77	0,81
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	11,68	0

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 1 [mm] při sledování 30 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha poróznosti 426 [μm^2], kruhovitost 0,79, ekvivalentní průměr plochy zrna 3,77 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 11,68 [μm^2].



Obr. 3-28 Struktura vzorku č. 5, tlustá partie

Tab. 3.17 Přehled hodnocených veličin na odlitku

Sledovaný parametr	Hodnota	Směrodatná odchylka
Tloušťka stěny [mm]	2,5	-
Počet objektů	33	-
Plocha [μm^2]	27689,2	-
Plocha porózy [μm^2]	378	-
Kruhovitost	0,89	0,07
Ekvivalentní průměr plochy zrna [μm]	4,60	0,76
Ekvivalentní plocha zrna [μm^2]	17,10	0

Z metody prahování, resp. ze sledování ekvivalentní velikosti zrn a kruhovitosti bylo zjištěno, že na tloušťce vzorku 2,5 [mm] při sledování 33 objektů na ploše 27 689,2 [μm^2] byla stanovena plocha porózy 378 [μm^2], kruhovitost 0,89, ekvivalentní průměr plochy zrna 4,60 [μm] a ekvivalentní plocha zrna 17,10 [μm^2].

Světlé oblasti na obr. 3-27 a 3-28 jsou krystaly β fáze (tuhý roztok hliníku v zinku) a tmavé partie odpovídají eutektiku ($\alpha_1 + \beta$), viz rovnovážný diagram na obr. 2-3.

3.2.2 Měření tvrdosti odlitků

Měření tvrdosti odlitků bylo provedeno s použitím metody podle Brinella (ČSN 42 0371). K měření byla použita kalená ocelová kulička, kde pro odlitky je používáno zatížení $F = 10 \cdot D^2$, kde D je průměr kuličky a doba působení je 30 [s]. Pro měření byla použita kulička o \varnothing 2,5 [mm], zatížení činilo 62,5 [kp]. Naměřené hodnoty tvrdosti pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce 3.18. Pro vypočítané statistické hodnoty tvrdosti odlitků byly použity tyto matematické vztahy:

Průměrná hodnota (aritmetický průměr):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

kde značí: n - počet měření tvrdosti

x_i - hodnotu naměřené tvrdosti [HB].

Směrodatná odchylka :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.2)$$

kde značí: \bar{x} - průměrnou hodnotu tvrdosti [HB].

Variační koeficient:

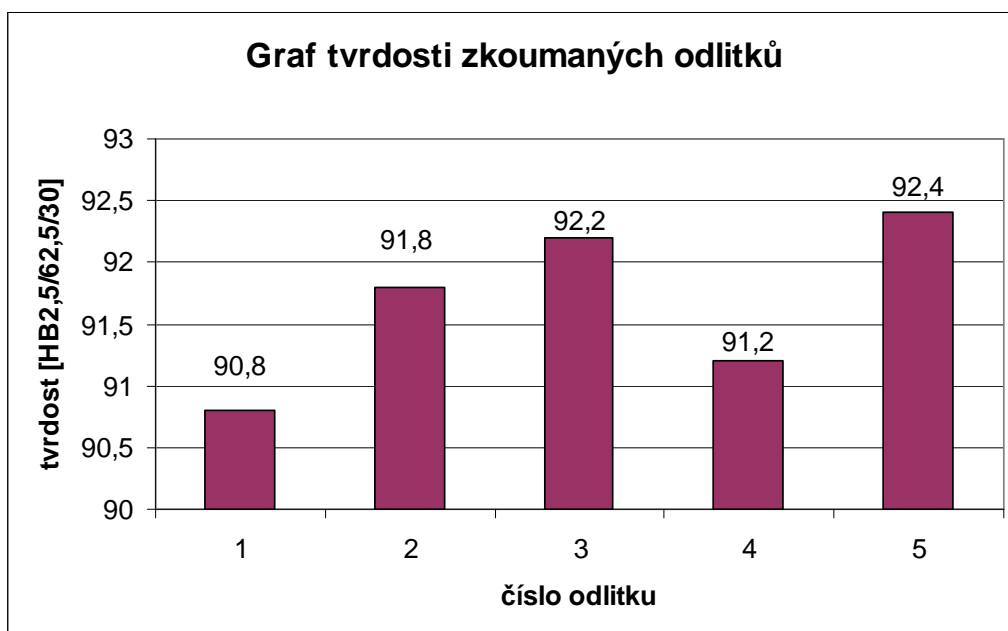
$$v = \frac{s}{\bar{x}}, \quad (3.3)$$

kde značí: s – směrodatnou odchylku.

Tab. 3.18 Přehled naměřených a vypočítaných hodnot tvrdostí odlitků ze slitiny zinku

Číslo odlitku	Naměřená tvrdost (x_i) HB5/250/30	Průměrná hodnota tvrdosti (\bar{x}) HB2,5/62,5/30	Směrodatná odchylka (s) HB2,5/62,5/30	Variační koeficient (v)
Odlitek č. 1	90, 93, 90, 90, 91	90,8	1,17	0,013
Odlitek č. 2	89, 92, 93, 93, 92	91,8	1,48	0,016
Odlitek č. 3	90, 93, 92, 94, 92	92,2	1,33	0,014
Odlitek č. 4	89, 92, 92, 93, 90	91,2	1,47	0,016
Odlitek č. 5	93, 93, 91, 92, 93	92,4	0,83	0,009

Na obr. 3-29 jsou souhrnně uvedeny hodnoty naměřených tvrdostí jednotlivých odlitků.



Obr. 3-29 Hodnoty naměřené tvrdosti pro zkoumané odlitky (č.1,2,3,4,5)
ze slitiny ZnAl4Cu1

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Tato diplomová práce zpracovává téma, které se týká slitin zinku. Slitiny zinku jsou v současné době významným materiálem pro výrobu drobných odlitků, především pro automobilový průmysl. Začínají nahrazovat některé karcinogenní plasty.

Zpracování slitin zinku je z hlediska přípravy taveniny poměrně jednoduché. Tyto slitiny se nemusí před odléváním očkovat ani modifikovat. Oba tyto efekty splňují podmínky vysokotlakého lití.

Řešení diplomové práce bylo zaměřeno na sledování souvislosti mezi tloušťku odlitku a velikostí a tvarem krystalické fáze β , kterou slitiny typu ZnAl_4Cu_1 obsahují.

Velikost zrn odlitku ovlivňují především dva faktory. Prvním je tloušťka stěny odlitku a druhým je dotlak. Se zvyšující tloušťkou stěny odlitku roste velikost zrn. Se zvyšujícím dotlakem se velikost krystalů, resp. zrn zmenšuje. Současně je třeba uvést, jak je obecně známo, že k nárůstu velikosti krystalů přispívá i menší ochlazovací schopnost slévárenské formy.

Zvyšující se tlak přispívá ke zmenšení kritické velikosti zárodku a podněcuje tzv. termické podchlazení, proto odlitky odlité s vyšším dotlakem vykazují drobnější strukturu. To lze přesvědčivě sledovat u výrazně rozdílných tloušťek stěn odlitků, v našem případě jsou tloušťky stěn málo rozdílné. Přesto je však ze získaných výsledků patrné, že při tloušťce odlitků v rozmezí 1 až 3 [mm] je ekvivalentní plocha zrna mezi 11,98 až 39,62 [μm^2]. Při tloušťce 4 až 6 [mm] je ekvivalentní plocha zrna 31,11 až 51,11 [μm^2]. Z měření je zřejmé, že velikost zrna s přibývajícím tloušťkou odlitku roste.

Výše uvedené výsledky je nutno chápat jen informativně, neboť pro další experimenty je nutné zpracovat celou řadu tloušťek odlitků, u kterých by byla sledována krystalická struktura, resp. velikost krystalů tuhého roztoku β .

Z měření tvrdosti je zřejmé, že odlitky ze slitin zinku ZnAl_4Cu_1 mají hodnotu tvrdosti přibližně 91,7 [HB_{2,5/62,5/30}].

Současně je nutno podotknout, že tvar a velikost struktury slitin zinku souvisí i s jeho krystalizací a krystalickou strukturou. Zinek krystalizuje v šesterečné soustavě, čímž se jeho krystalizace liší od krystalizace jeho slitin.

5. ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na studium krystalizace odlitků ze slitin zinku v závislosti na tloušťce stěny a velikosti tlaku, resp. dotlaku, který je typický při vysokotlaké výrobě odlitků.

Diplomová práce je tvořena ze dvou základních částí – rešeršní a experimentální. V *části rešeršní* je uveden přehled všech náležitostí, které jsou spojeny s výrobou odlitků ze slitin zinku. Jsou popsány druhy slitin zinku, metody a zásady tlakového lití, včetně používaných strojů.

Experimentální část práce obsahuje popis metodiky, která byla uplatněna pro hodnocení krystalizace odlitků ze slitin zinku. K tomuto účelu bylo použito 5 druhů různých odlitků, které byly vyrobeny ze slitiny ZnAl4Cu1 a odlévány s dotlakem 20 a 30 [MPa] ve firmě Beneš a Lát, a. s., závod Slaná u Semil.

Z experimentální části diplomové práce lze formulovat tyto dílčí závěry:

1. Při rychlém ochlazení slitiny tuhnoucí v kovové formě je eutektoidní rozpad částečně potlačen a slitina obsahuje více přesyceného roztoku β , než odpovídá rovnovážnému stavu. Tato fáze β je na většině vzorků velmi dobře rozpoznatelná.
2. Velikost zrn je závislá na době tuhnutí odlitku, resp. jeho tloušťce stěny (rychlost odvodu tepla z odlitku) a také na dotlaku. Při určitém definovaném temperačním režimu formy.
3. Velikost zrn u jednotlivých typů odlitků lze charakterizovat následovně při vysokotlaké lití na tlakovém stroji s teplou komorou:
vzorek č. 1 velikost zrn je od 20,93 do 31,11 [μm^2] (dotlak 30 [MPa]);
vzorek č. 2A velikost zrn je od 22,73 do 39,62 [μm^2] (dotlak 20 [MPa]);
vzorek č. 2B velikost zrn je od 24,58 do 59,39 [μm^2] (dotlak 20 [MPa]);
vzorek č. 3 velikost zrn je od 34,72 do 51,11 [μm^2] (dotlak 20 [MPa]);
vzorek č. 4 velikost zrn je od 26,06 do 35,80 [μm^2] (dotlak 30 [MPa]);
vzorek č. 5 velikost zrn je od 11,68 do 17,10 [μm^2] (dotlak 20 [MPa]).

Z uvedených hodnot je patrné, že velikost zrn roste s tloušťkou stěny odlitku, při dotlaku 30 [MPa] a tloušťce stěny 1,5 [mm] velikost zrn odpovídá hodnotě velikosti plochy zrna 20,93 [μm^2]. Při tloušťce 4 [mm] je velikost plochy zrna 31,11 [μm^2]. Při dotlaku 20 [MPa] a tloušťce stěny 1,5 [mm] velikost zrn

odpovídá hodnotě velikosti plochy zrna $22,73 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při tloušťce 3 [mm] je velikost plochy zrna $39,62 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při dotlaku 20 [MPa] a tloušťce stěny 1 [mm] velikost zrn odpovídá hodnotě velikosti plochy zrna $24,58 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při tloušťce 5 [mm] je velikost plochy zrna $59,39 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při dotlaku 20 [MPa] a tloušťce stěny 1,5 [mm] velikost zrn odpovídá hodnotě velikosti plochy zrna $34,72 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při tloušťce 5 [mm] je velikost plochy zrna $51,11 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při dotlaku 30 [MPa] a tloušťce stěny 1,8 [mm] velikost zrn odpovídá hodnotě velikosti plochy zrna $26,06 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při tloušťce 5 [mm] je velikost plochy zrna $35,8 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při dotlaku 20 [MPa] a tloušťce stěny 1 [mm] velikost zrn odpovídá hodnotě velikosti plochy zrna $11,68 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Při tloušťce 2,5 [mm] je velikost plochy zrna $17,10 \text{ } [\mu\text{m}^2]$.

4. Tvrdost, která byla měřena na odlitcích č. 1 až č. 5 se pohybuje od 90,8 až 92,4 [HB_{2,5/62,5/30}]. Tato hodnota je pouze orientační, neboť tato slitina podléhá, podobně jako některé slitiny hliníku, precipitačnímu vytvrzování. Tvrdost odlitků byla měřena týden po jejich výrobě.

Ekonomické hodnocení nebylo provedeno, neboť se jedná o prvotní práci v této oblasti, týkající se základního výzkumu.

Pro další výzkum doporučuji, aby byly provedeny experimenty při odlévání do kovové formy gravitačním způsobem předeřáté na určité teploty a také do pískové formy a dále sledovat, porovnávat a vyhodnocovat velikosti zrn slitin zinku odlitých do těchto forem.

6. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu I.,3. svazek 2.vydání, ACADEMIA, 1973.
- [2] GRÍGEROVÁ, T., LUKÁČ, I., KOŘENÝ, R.: Zlívárenstvo neželezných kovov, 1.vydání, ALFA, 1988.
- [3] ROUČKA, J.: Metalurgie neželezných slitin, 1.vydání, VUT v Brně, 2004.
- [4] CHVOJKA, J.: Neželezné kovy a jejich slitiny, 1. vydání, SNTL Praha, 1971.
- [5] MALCEV, M. V., BARSUKOVÁ, T. A., BORIN, F. A.: Metalografia neželezných kovov a zliatin, 1. vydání, 1963.
- [6] NOVÁ, I. : Teorie slévání II., skripta, TU v Liberci, 1. vydání, 2003.
- [7] DALECKÝ, M.: Sledování vlivu podmínek ochlazování na krystalizaci odlitků ze slitin zinku, Diplomová práce, TU v Liberci, 2006.
- [8] HRABÁNEK, R.: Uplatnění tlakových odlitků ze slitin zinku v konkurenci se slitinami hliníku a hořčíku. Slévárenství XLIX, 2001, č. 4, s. 223-225.
- [9] PTÁČEK, L., USTOHAL, V.: Slitiny zinku pro odlitky. Slévárenství XLIX, 2001, č. 4, s. 203 - 208.
- [10] Zdroje z internetu: www.dynacast.com, www.kdzs.cz.
- [11] BATYŠEV, A. I.: Kristallizacija metalov i splavov pod davlenijem, Moskva, Mettallurgija, 1977.
- [12] KRÝSLOVÁ, S.: Sledování slévárenských vlastností slitin zinku pro výrobu odlitků, Doktorská práce, TU v Liberci, 2008.



P Ř Í L O H A



Příloha č. 1

Technické parametry plynové tavící pece

Obsah kelímku	max. 1 000 [kg] Zn
Tavící výkon	max. 400 [kg Zn/h]
Palivo	ZP o tlaku 2 [kPa] před pecí
Rozměry kelímku	délka: ~ 1 200 [mm] šířka spodní: ~ 400 [mm] šířka horní: ~ 450 [mm] výška: ~ 350 [mm]

Materiál kelímku plech tloušťka 12 [mm] z materiálu třídy 17

Způsob zakládání vsázky

- ruční zakládání do plnicí kapsy pece
- zakládacím dopravníkem

Způsob odběru taveniny

- čerpadlem do mobilní pece
- ruční odběr z udržovací komory

Otop pece

plně automatický hořák s UV sondou a VN zapalováním

Instalovaný příkon ~ 100 [kW]

Max. spotřeba plynu 10,5 [m³/h]

Způsob regulace hořáku automatická systémem 0 – MIN – MAX dle termočlánků v tavenině a na stěně kelímku
programu temperování pece přes víkend



Měrná spotřeba ZP (netto)	max. 15 [m ³ /1t] Zn
(tavící výkon 0,4 [t/h], nahřátá pec, teplota taveniny 440 [°C])	
Měrná spotřeba ZP při udržování taveniny na 440 [°C]	max. 3,5 [m ³ /h]
Způsob měření hmotnosti taveniny	tenzometrická váha pod pecí se 4 snímači
Způsob odtahu spalin	4 odtahy v horní části pece do sběrače spalin nad pecí
Množství spalin při jmen. výkonu hořáku	max. 140 [m ³ /h]
Rozměr pece	délka ~ 1 500 [mm]
	šířka ~ 1 000 [mm]
	výška ~ 950 [mm]
Hmotnost pece (bez vsázky)	cca 2 [t]
Elektrický příkon	0,5 [kW] (3 x 400 [V]) – topný systém
	0,3 [kW] (3 x 400 [V]) – základací dopravník
	0,2 [kW] (3 x 400 [V]) – čerpadlo Zn



Příloha č. 2

Technické parametry stroje Frech DAW 50



Uzavírací síla stroje 600 [kN]

Pracovní zdvih pístu 230 [mm]

Maximální síla pro vstřikování 40 [kN]

Maximální průměr pístní komory 70 [mm]

Maximální tloušťka formy 350 [mm]

Minimální tloušťka formy 120 [mm]

Základová deska stroje 460 x 460 [mm]

Pracovní vzdálenost 300 [mm]

Horizontální vzdálenost 300 [mm]

Pracovní průměr pístu 50 [mm]

Maximální počet pracovních cyklů za hod. 1100

Výkon motoru 7.5 [kW]

Celkové rozměry stroje (délka - šířka - výška) 4000 [mm]; 1650 [mm]; 2250 [mm].



Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, 5. ledna 2011

.....
Jana Holečková



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

In Liberec 5th January 2011

.....
Jana Holečková
